



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANSSI JAAKKOLA
KONTTITERMINAALIEN KESKIJÄNNITEVERKOT JA VERKKOON
LIITETTÄVÄT EPÄLINEAARISET KUORMAT

Diplomityö

Tarkastaja:
professori Seppo Valkealahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
18. joulukuuta 2017

TIIVISTELMÄ

ANSSI JAAKKOLA: Konttiterminaalien keskijänniteverkot ja verkkoon liitettävät epälineaariset kuormat

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 44 sivua, 0 liitesivua

Kesäkuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja markkinat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: harmoniset yliaallot, epälineaarinen kuorma, keskijänniteverkko, konttiterminaali

Cargotec Oyj:hin kuuluva Kalmar tulee tarjoamaan tulevaisuudessa maailmanlaajuisesti sijaitseville asiakkailleen uudenlaisia ratkaisuja lastinkäsittelyyn. Uudet ratkaisut edellyttävät uudenlaisten kuormien kytkemistä paikallisten konttiterminaalien sähköverkkoihin. Työn tavoitteisiin kuuluu selvitys yhdestä keskijännitetasoisesta kolmivaiheiliitynnästä paikalliseen sähköverkkoon eri maanosissa sijaitsevilla konttiterminaaleilla. Tavoitteena on myös selvittää, kuinka epälineaarisen kuorman aiheuttamien harmonisten yliaaltovirtojen summautuminen sähköverkossa toteutuu, kun useita samantyyppisiä epälineaarisia kuormia kytketään sähköverkkoon. Lisäksi tutkitaan tarvetta järjestelmän aiheuttamien harmonisten yliaaltojen vaimentamiseen.

Työ jakaantuu kahteen osaan. Yksittäistä epälineaarista kuormaa tutkittiin tarkemmin sähkön laadun kannalta Kalmarin testikentällä tehtyjen mittausten avulla, jotta saatiin käsitys lisäävien kuormien vaikutuksesta sähkön laatuun. Mittaustulokset osoittivat, että epälineaarisen kuorman aiheuttama virran harmoninen kokonaissärö täydellä teholla on 13,4 %, jota voidaan pitää haitallisena arvona järjestelmän häviöiden sekä komponenttien eliniän kannalta. 10 epälineaarisen kuorman aiheuttamien harmonisten yliaaltovirtojen summautumisesta annettiin arvio jo tehtyjen tutkimuksien perusteella. Arvion mukaan on mahdollista, että 3. harmoninen yliaaltovirta kumoutuu noin 30 prosenttisesti, jonka lisäksi korkeammilla virtayliaalloilla on mahdollista saavuttaa vielä suurempia arvoja. Lisäksi todettiin, että yksinkertaisin ja käytännöllisin ratkaisu harmonisten yliaaltovirtojen minimoimiseksi on induktiivisen reaktanssin lisääminen järjestelmään käyttäen fyysisesti suurempaa muuntajaa syöttämään epälineaarista kuormaa, millä varmistetaan standardien mukainen sähkön laatu.

Tutkimuksessa epälineaarisen kuorman liittämistä eurooppalaisen ja pohjois-amerikkalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkkoon käytettiin hyväksi kyseisten konttiterminaalien sähkösuunnitelmia, joiden perusteella selvitettiin paikallisilla sähköasemilla sijaitsevien keskijännitekojeistojen tyypit, jonka jälkeen valittiin oikeanlaiset keskijännitekaapelit sekä kaapelipäätteet. Kaapelilähdöt suojataan releillä, joissa käytetään oikosulku- ja maasulkusuojauksia. Kaapelilähtöä suojaavan releen laukaisukäyrinä käytetään käänteisaikaista sekä vakioaikaista laukaisua ja releen toiminta-ajoille asetetaan suojauksen selektiivisyyden täyttävät arvot.

ABSTRACT

ANSSI JAAKKOLA: Medium voltage grids of container terminals and grid-connected non-linear loads

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 44 pages, 0 Appendix pages

June 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Electric Grids and Markets

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: harmonics, non-linear load, medium voltage grid, container terminal

Kalmar, which is a part of Cargotec Oyj, will be offering in the future new types of solutions for cargo handling for its globally located customers. New solutions require for new types of loads to be installed to local electric grids of container terminals. One of the objectives of this thesis is to find out how a three-phase medium voltage cable connection can be made to already existing medium voltage grids in container terminals located in different continents. The other objective is to find out how the current harmonics generated by the multiple non-linear loads will be summed in the electric grid. Need for harmonic filtering will also be investigated.

This thesis is sectioned into two parts. An effect of a single non-linear load to the quality of power supply was investigated by conducting measurements of harmonic currents and voltages at Kalmar test site. Results indicated that the total harmonic distortion of load current generated by the non-linear load is 13,4 % at full power, which can be considered as harmful amount as it will increase system losses and shorten the lifespan of components in the system. Summation of harmonic currents generated by the 10 non-linear loads were estimated based on the previous studies. According to those studies it is possible that approximately 30 % of the 3rd harmonic current will be cancelled out. For higher harmonics an even higher cancellation can be possible. It was also stated that the simplest and the most practical way to mute the current harmonics is to increase the amount of inductive reactance in the supply, which can be done by using a physically larger transformer to supply the non-linear load. This ensures that the power quality will meet the values set in standards.

Investigation of connecting the non-linear load to the European and North-American container terminal medium voltage grids was conducted by reading the local electrical diagrams, which were used to determine the type of the local medium voltage switchgear. After that it was possible to choose the applicable medium voltage cables and cable terminations. Feeding cables are protected by relays, which use overcurrent and earth fault functions. Relays will be activated on set current values based on both inverse proportional relationship between the operating time of the relay and the function of the current as well as on definite time operation mode. Relay operation times will be set in such a way that the selectivity of the protection will be ensured.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Cargotec Oyj:hin kuuluvan Kalmarin konttilukkien tuotekehityksyksikölle. Työn ohjaajana toimi insinööri (ylempi AMK) Juho Leskinen Kalmarilta ja tarkastajana professori Seppo Valkealahti Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Haluan kiittää ohjaajani Juhon lisäksi Mikko Nurmela ja Olli Salomaata Kalmarilta diplomityön järjestämisestä nopealla aikataululla sekä mukavasta työilmapiiristä. Lisäksi haluan kiittää työnantajani edustajaa Jani Hiltusta Etteplanilta maisterin tutkinnon suorittamisen mahdollistamisesta työn ohella. Suuret kiitokset myös työn tarkastajalle Sepolle.

Viimeiset ja suurimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin Iskälle, Empulle, Jossulle, Muorille, Vaarille, Johannalle sekä kaikille ystäväilleni, joiden tarjoama tuki on ollut sanoin kuvaimattoman arvokasta tähän pisteeseen asti.

Tampereella, 22.5.2018

Anssi Jaakkola

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KESKIJÄNNITEVERKOT JA HARMONISET YLIAALLOT	2
2.1	Yliaallot	2
2.2	Harmonisten yliaaltojen summautuminen	5
2.3	Pakkokommutoidut tasasuuntaajat	9
2.4	Suotimet	11
2.4.1	Passiiviset suotimet	12
2.4.2	Aktiiviset suotimet	13
2.5	Keskijännitejakeluverkko	16
2.6	Keskijänniteverkon suojaus	17
2.6.1	Ylivirtasuojaus	18
2.6.2	Maasulkusuojaus	18
3.	TUTKIMUSMENETELMÄT	21
3.1	Maanosakohtaisten konttiterminaalien keskijänniteverkot	21
3.2	Epälineaarinen kuorma	21
3.3	Mittausmenetelmät	23
4.	TULOKSET	24
4.1	Eurooppalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkko	24
4.2	Pohjois-amerikkalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkko	30
4.3	Mittaustulokset	33
4.3.1	Jatkuvan tilan harmoniset yliaallot	34
4.3.2	Muutostilan harmoniset yliaallot	37
4.4	Harmonisten yliaaltojen kumoutuminen	39
4.5	Harmonisten yliaaltojen vaimentaminen	40
5.	YHTEENVETO	41
	LÄHTEET	43

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ASC	engl. Automatic Stacking Crane, automaattinen konttinosturi
DC	engl. Direct Current, tasavirta
DT	engl. Definite Time, vakioaika-ominaiskäyrä
EV	engl. Electric Vehicle, sähköauto
EPR	engl. Ethylene Propylene Rubber, eteeni-propeenikumi
Hx	Harmoninen virta- tai jänniteyliaaltokomponentti, jossa x kuvaa kerroinnumeroa 50 Hz taajuudelle
IDMT	engl. Inverse Definite Minimum Time, käänteisaika-ominaiskäyrä
IGBT	engl. Insulated Gate Bipolar Transistor, hilaeristetty bipolaaritransistori
LC	kelan ja kondensaattorin sarjaankytkentä
LCL	kahden kelan ja yhden kondensaattorin sarjaankytkentä
PWM	engl. Pulse-Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
SIT	engl. Standard Inverse Time, toiminta-aikakäyrä
TDD	engl. Total Demand Distortion, harmoninen kokonaissärö nimellisvirralla
THD	engl. Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö
TMS	engl. Time Multiplier Setting, releen toiminta-aika-asetus
XLPE	engl. Cross-Linked Polyethylene, ristisilloitettu polyeteeni
α	releen toiminta-ajan laskentaan käytettävä vakio
β	releen toiminta-ajan laskentaan käytettävä vakio
C_f	passiivisen LC-suotimen kondensaattorin kapasitanssi
C_D	kondensaattorin kapasitanssi
D_N	tasasuuntaajan negatiivisella DC-puolella oleva diodi
D_P	tasasuuntaajan positiivisella DC-puolella oleva diodi
f_r	resonanssitaajuus
h	virran tai jännitteen harmoninen yliaaltokomponentti
I	kuormavirran tehollisarvo
I_k	vikavirta kuormaa syöttävällä sähköasemalla
I_D	kuormalle menevä tasavirta
i_{dc}	kondensaattorin kapasitanssia C_D lataava virta
i_{Dp}	diodin D_P läpi kulkeva virta
I_{fh}	suotimen läpi kulkeva harmoninen yliaaltovirtakomponentti
I_h	harmoninen yliaaltovirta
I_L	kuorman maksimivirta
I_p	kuorman ottaman pätövirta
I_q	kuorman ottaman loisvirta
$I_{RMS,h,n}$	yksittäisen kuorman n harmoninen yliaaltovirtakomponentti järjestysnumeroltaan h
$I_{RMS,h,total}$	kaikkien järjestelmän kuormien yhteenlaskettu harmoninen yliaaltovirtakomponentti järjestysnumeroltaan h
i_s	syöttävästä verkosta tasasuuntaajaan tuleva virta
I_S	releen mittaaman virran asetteluarvo
I_{SC}	liittymän oikosulkuvirta
I_{sh}	suodatettu syöttävään verkkoon palaava virta
i_{Tn}	transistorin T_N läpi kulkeva virta

K	releen toiminta-ajan laskentaan käytettävä vakio
K_{can}	harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumiskerroin
L_f	passiivisen LC-suotimen kelan induktanssi
L_S	syöttävän verkon induktanssi
n	epälineaarinen kuorma
N	epälineaaristen kuormien lukumäärä
R	kaapelin ominaisresistanssi
S	kuorman ottama näennäisteho
T	releen toiminta-aika I_S :n ollessa 10-kertaisessa arvossaan
T_d	releen toiminta-aika sekunteina
T_N	tasasuuntaajan negatiivisella DC-puolella oleva transistori
T_P	tasasuuntaajan positiivisella DC-puolella oleva transistori
U	pääjännite
U_Δ	kaapelin jännitteenalenema
U_1	jännitteen 50 Hz perustaajuinen tehollisarvo
U_h	harmoninen yliaaltojännite
U_{THD}	jännitteen kokonaissärökerroin
X	kaapelin ominaisreaktanssi
Z_h	harmonista yliaaltovirtaa vastustava impedanssi

1. JOHDANTO

Pörssiyhtiö Cargotec Oyj:hin kuuluva Kalmar tarjoaa alaa uudistavia lastinkäsittelylaitteita, automatisoituja terminaaliratkaisuja, ohjelmistoja ja palveluja. Kalmarin asiakkaisiin kuuluvat satamat ja konttiterminaalit sekä teollisuus- ja logistiikka-alan yritykset ympäri maailman. Kalmarin tarjoamat uudet ratkaisut lastinkäsittelyyn vaativat olemassa olevilta konttiterminaalien sähkönjakelujärjestelmiltä kapasiteettia tehon syöttöön sekä vapaita kaapelilähtöjä sähköasemilla. Konttiterminaalien sähkönjakelujärjestelmät ovat oletettavasti erilaisia eri maanosissa, joten laitetoimituksia niihin tekevällä Kalmarilla on ilmeinen tarve olemassa oleviin sähköverkkoihin liittyvään selvitykseen.

Tämän työn tavoitteisiin kuuluu selvitys yhden eurooppalaisen sekä yhden pohjois-amerikkalaisen konttiterminaalien sähkönjakelujärjestelmistä keskijännitetasolla. Tavoitteena on myös selvittää, kuinka harmonisten virtojen summautuminen sähköverkossa toteutuu, kun useita samantyyppisiä epälineaarisia kuormia kytketään sähköverkkoon. Yksittäistä epälineaarista kuormaa tutkitaan tarkemmin sähkön laadun kannalta Kalmarin testikentällä tehtyjen mittausten avulla. Näin saadaan käsitys lisättävien kuormien vaikutuksesta sähkön laatuun.

Tarkemmin määriteltynä koko työssä on kyseessä selvitys yhdestä keskijännitetasoisesta kolmivaiheiliittynästä paikalliseen sähköverkkoon eri maanosissa sijaitsevista konttiterminaleista. Selvitys tehdään, jotta tulevaisuudessa paikallisiin sähköasemiin lisättävien epälineaaristen kuormien liittämisestä saadaan selkeä ja tarkka yleiskäsitys. Tämän työn tulokset tulevat säästämään aikaa varsinaisessa suunnitteluvaiheessa, kun olemassa olevaan sähköverkkoon suunnitellaan kuormien lisäämistä.

Käytettävissä oleva tutkimusmateriaali käsittää Euroopassa sekä Pohjois-Amerikassa sijaitsevien konttiterminaalien sähkösuunnitelmat, joiden perusteella voidaan selvittää tulevaan maakaapeliliitäntään liittyvät komponentit, asennustavat sekä releiden suojausasettelut. Sähkön laatuun liittyviä tutkimuksia voidaan hyödyntää harmonisten virtojen summautumista tarkastellessa. Lopuksi virtojen summautumisesta annetaan arvio ja tarjotaan mahdollinen suodintratkaisu, jolla standardien mukainen sähkön laatu varmistetaan. Tämän diplomityön rakenne koostuu sähkön laatuun ja sähköverkkoihin liittyvästä teoriaosuudesta, josta se etenee maanosakohtaisten tutkimusmenetelmien esittelystä maanosakohtaisiin tuloksiin sekä epälineaarisen kuorman mittaustuloksiin. Dokumentin viimeisen luvun yhteenvedossa kerrataan työn tavoitteet ja esitellään tiivistetysti saavutetut tulokset.

2. KESKIJÄNNITEVERKOT JA HARMONISET YLIAALLOT

Tässä luvussa esitellään tämän diplomityön kannalta olennaisia aiheita liittyen muun muassa keskijänniteverkon perusteoriaan, rakenteeseen sekä suojaukseen. Sähköverkossa esiintyviin yliaaltovirtoihin ja -jännitteisiin liittyvä teoria, standardit sekä niitä aiheuttava pakko-kommutoitu tasasuuntaaja esitellään myös, sillä luvussa 3.2 esiteltävä epälineaarinen kuorma on käytännössä sen tyyppinen laite. Lisäksi selvitetään useasta lähteestä sähköverkkoon syntyneiden harmonisten yliaaltojen kumoutuminen aiheeseen liittyvien tutkimuksien avulla ja esitellään mahdollisia suodinratkaisuja rajoittamaan niiden aiheuttamia vaikutuksia sähköverkolle.

2.1 Yliaallot

Yliaallot voidaan jakaa harmonisiin sekä epäharmonisiin. Harmoniset yliaallot ovat virta- tai jännitekomponentteja, joiden taajuus on perustaajuuden kokonaislukukerrannainen. Epäharmoniset yliaallot taas ovat muita kuin perustaajuuden kokonaislukukerrannaisia yliaaltoja. Resistiiviset kuormat, kuten hehkulamput, eivät aiheuta harmonisia yliaaltoja, sillä ne ottavat verkosta vain perustaajuista virtaa. Harmonisia yliaaltovirtoja aiheuttavat kuormat eivät ota verkosta sinimuotoista virtaa. Tällaisia kuormia ovat esimerkiksi tasasuuntaajat ja niiden syöttämät epälineaariset piirit. Tasasuuntaajia ohjattaessa katkaisuohjauksella, virran syöttö jaetaan virrallisiin ja virrattomiin jaksoihin, joiden pituuksien suhdetta voidaan vaihdella. Jakson vaihtuessa toiseen syntyy pientaajuinen suorakaiteen muotoinen jännitehäiriö eli verkon jännite voi muuttua äkillisesti. [1]

Tasasuuntaajaa ohjattaessa ohjauskulmasäädöllä jännitteen puoliallostasta leikkautuu osa pois, mikä aiheuttaa virtaan ja sitä kautta jännitteeseen yliaaltoja, jotka ovat taajuudeltaan perustaajuuden kokonaislukukerrannaisia. Näin toimivat puolijohdesillat ovat verkossa yliaaltovirtalähteitä. [1]

Kun yliaaltovirrat virtaavat johtimessa, johtimen taajuudesta riippuva reaktanssi kasvaa. Täten jokaiselle yliaaltovirran kerrannaiselle h on oma impedanssinsa Z_h . Kun harmoninen yliaaltovirta I_h , kulkee impedanssin Z_h läpi, syntyy harmoninen jännite U_h ohmin lain mukaisesti. Epälineaaristen kuormien aiheuttamat harmoniset yliaaltovirrat summautuvat sähköaseman kiskolla luoden harmonisen särön, sillä niiden suunta on kohti syöttävää verkkoa. Johtuen epälineaaristen kuormien erilaisuudesta, saman järjestysluvun harmoniset yliaaltovirrat eivät yleensä ole vaihekulmaltaan täsmälleen samoja, mikä johtaa yliaaltovirtojen osittaiseen summautumiseen. [2]

Mikäli kolmas harmoninen yliaalto on täsmälleen symmetrinen joka vaiheessa, se vastaa 50 Hz:n perustaajuista nollakomponenttia, eikä mene Dy-kytkentäisen muuntajan läpi pienjännitepuolelta keskijännitepuolelle. Muut kolmella jaolliset yliaallot summautuvat nollajohtimeen ja kuormittavat sitä. [1, 2]

Yliaaltojen häittavaikutuksia on useita ja niihin lukeutuu muun muassa komponenttien lämpeneminen, häviöiden lisääntyminen, mittaus- ja ohjauslaitteistoihin sekä kommunikaatioverkkoihin aiheutuvat häiriöt. Muita huomattavia haittoja ovat jakeluverkon ylikuormittuminen virtojen tehollisarvojen kasvaessa, nollajohtimen virran kasvaminen vaihevirtoja suuremmaksi sekä verkon komponenteissa, kuten muuntajissa, esiintyvät ongelmat liittyen muun muassa ylikuormitukseen, värähtelyyn sekä käyttöiän lyhenemiseen kuumenemisen aiheuttaman eristeen heikentymisen vuoksi. Käytettäessä tehotransistoreja tasasuuntaukseen on mahdollista käyttää useampitasoista pulssinleveysmodulaatiota, joka mahdollistaa yliaaltojen rajauksen huomattavasti korkeammille taajuuksille kuin perinteisemmissä tyristorisuuntaajissa. [1]

Harmoniset yliaallot voidaan kuvata yksittäisten yliaaltojen suuruuden ja vaihekulman avulla. Yleensä yksittäisten harmonisten suuruus määritellään prosentteina perustaajuudesta virrasta tai jännitteestä. Toinen yleinen tapa esittää harmonisia yliaaltoja on kaavan 1 mukainen kokonaissärökerroin U_{THD} . THD on lyhenne sanoista Total Harmonic Distortion ja se kuvaa yksittäisten harmonisten yliaaltojännitteiden U_h summan suhdetta jännitteen perustaajuuden tehollisarvoon U_1 . [1]

$$U_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (1)$$

Standardi SFS-EN 50160 [3] määrittelee normaaleissa käyttöolosuhteissa keskijännitejakeluverkon jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvon järjestyslukuun 25 saakka. Yhden viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin standardissa annettu arvo. Raja-arvo esimerkiksi kolmannen harmonisen yliaallon suhteelliselle jännitteelle on 5 %. Viidennen harmonisen yliaallon suhteellisen jännitteen raja-arvo on 6 %. Kokonaissärökertoimen, joka ottaa huomioon kaikki harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 asti, tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.

IEEE 519-2014 -standardi [4] suosittelee yli yhden kilovoltin jakeluverkon kiskoissa alle 3 % suuruista arvoa yksittäisille harmonisille kokonaissärökertoimen ollessa alle 5 %. Raja-arvot on annettu sähköverkon yhteiselle pisteelle, joka on lähinnä sähköön kuluttajaa ja josta sähköä jaetaan myös toiselle kuluttajalle. Käytännössä tämä tarkoittaa teollisuusympäristössä siis keskijännitetasoista liittymäkohtaa yleiseen jakeluverkkoon, sillä teollisuudessa yksittäisillä sähköön kuluttajilla saattaa olla oma muuntamonsa.

Loppukäyttäjille suunnattu standardi määrittelee raja-arvot myös virran säröytymiselle, sillä mikäli verkkoon kytkettävät kuormat aiheuttavat yliaaltovirtoja standardin sallimissa rajoissa, myös yliaaltojännitteet ovat sallituissa rajoissa. Yksittäisten suhteellisten yliaaltovirtojen arvoja verrataan kuorman ottamaan maksimivirtaan I_L . Yliaaltovirtojen raja-arvot vaihtelevat liittymän suurimman oikosulkuvirran I_{SC} mukaan. Raja-arvot parittomille harmonisille yliaaltovirroille 0,12-69 kV järjestelmissä esitetään taulukossa 1. Parillisille harmonisille raja-arvoina käytetään 25 % taulukon arvoista.

Taulukko 1. Parittomien harmonisten yliaaltovirtojen raja-arvot [4].

Prosentuaaliset maksimi-arvot harmonisille yliaaltovirroille maksimikuormavirrasta						
Järjestysluku						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Järjestysluvultaan alle 11 olevien yliaaltovirtojen suhteelliset maksimi-arvot ovat 4-15 % riippuen liittymän oikosulkuvirrasta TDD-arvon ollessa 5-20 %. Lyhenne TDD tulee sanoista Total Demand Distortion, joka tarkoittaa harmonisten yliaaltovirtojen summaa suhteessa kuorman ottamaan maksimivirtaan. Verkon yhteisessä pisteessä sähkön kuluttajien pitää rajoittaa harmonisia yliaaltovirtojaan taulukon 1 mukaisesti siten, että:

- 99 % päivittäisen alle 3 sekunnin kestävästä harmonisista yliaaltovirroista on vähemmän kuin 2.0 kertaa taulukossa annettu arvo.
- 99 % viikoittaisen alle 10 minuuttia kestävästä harmonisista yliaaltovirroista on vähemmän kuin 1.5 kertaa taulukossa annettu arvo.
- 95 % viikoittaisen alle 10 minuuttia kestävästä harmonisista yliaaltovirroista on vähemmän kuin taulukossa annettu arvo.

Epäharmonisille virtakomponenteille ei ole standardissa annettu raja-arvoja, mutta kuluttajien on syytä rajoittaa ne riittävän alhaiselle tasolle, jotta välttytään ei-toivotuilta vaikutuksilta syöttävässä sähköjärjestelmässä sekä siihen kytketyissä laitteissa. Epäharmonisten jännitekomponenttien rajausta perustuu valojen välkyntään. Yli 1 kV ja alle 69 kV järjestelmissä 95 % viikoittaisen lyhytkestoisen harmonisen jännitekomponentin raja-arvo on 3 % nimellisestä jännitteestä 0-120 Hz taajuusalueella. [4]

2.2 Harmonisten yliaaltojen summautuminen

Kun tutkitaan useiden tasasuuntaajakuormien aiheuttamien harmonisten yliaaltovirtojen summautumista verkkoon, on hyödyllistä tarkastella sähköautojen latausasemien sähkön laatuun liittyviä tutkimuksia. Sähköautojen latausasemat ovat käytännössä tehomuuntimia, jotka tasasuuntaavat vaihtosähkön auton akustolle. Latausasemien vaikutukset sähkön laatuun ovat siis hyvin samantyyppisiä kuin luvussa 3.2 esitetävän epälineaarisen kuorman, niiden nimellisteho on vain pienempi. Sähköauton latausasema sisältää käytännössä myös suotimen, jotta tasasuuntaajan aiheuttamien yliaaltovirtojen haittavaikutukset voidaan pitää standardien mukaisissa rajoissa.

Sähköautojen latausasemien sähkön laatuun liittyvää tutkimusta on tehnyt muun muassa Aalto-yliopiston sähkö- ja automaatiotekniikan tiedekunta yhdessä Tallinnan teknillisen yliopiston sähkötekniikan tiedekunnan kanssa. Tutkimuksessa [5] käytettävät kuormat ovat moderneja kaupallisiin sähköautoihin integroituja sekä kotikäyttöön soveltuvia yksivaiheisia latausjärjestelmiä ja ne toimivat 230 V jännitteellä. Erityyppisiä sähköautoja tutkimuksessa on 4 ja niitä ladataan erisuuruisilla virroilla. Latausvirta vaihtelee autojen välillä 9,7 A 12,7 A ja latausteho välillä 2,2 kW 2,9 kW. Tutkimuksiin, joiden tekijöihin kuuluvat Staats et al. [6] sekä Gomez et al. [7], viitataan asiaan liittyvässä teoriassa.

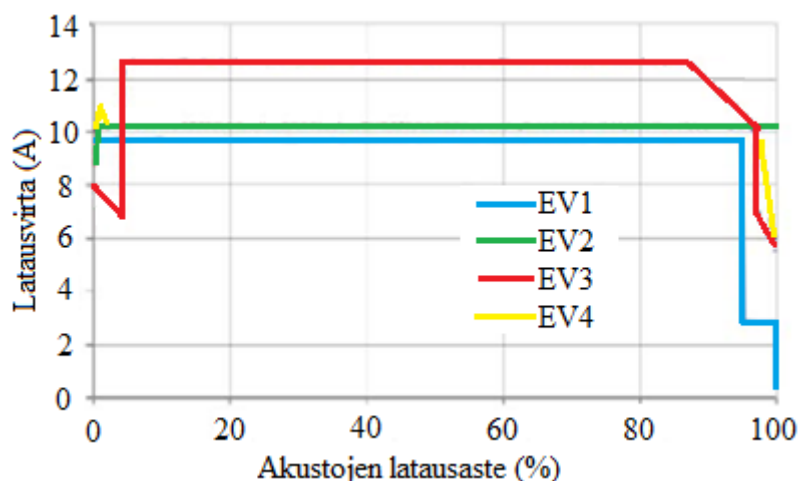
Käytännössä lisättäessä epälineaarisia kuormia verkkoon, kasvavat samalla myös verkossa esiintyvien virtojen erilaiset aaltomuodot. Kyseisten aaltomuotojen poiketessa sinimuodosta eri tavoin, eroavat myös harmonisten säröjen muodot toisistaan. Tämän työn sovelluksessa käytettävien laitteistojen aiheuttamat erilaisuudet harmonisten yliaaltovirtojen aaltomuotoihin ovat kuitenkin minimissään, sillä kaikki tasasuuntaajat ovat samantyyppisiä. Koko järjestelmän harmonisten yliaaltovirtojen summa saadaan laskettua, kun kaikkien järjestelmään kytkettyjen yksittäisten kuormien harmoniset yliaaltovirratt summatetaan yhteen. Yksittäisten virtakomponenttien summaus täytyy tehdä geometrisesti, sillä jokainen harmoninen yliaaltovirtakomponentti määritellään virran suuruuden sekä vaihekulman avulla. [5, 6]

Harmonisten yliaaltovirtojen kumoutuminen tapahtuu, kun yksittäiset epälineaariset kuormat aiheuttavat harmonisia yliaaltovirtoja, joiden vaihekulmat ovat toisistaan poikkeavia. Kun kahden eri lähteestä tulevan harmonisen yliaaltovirran vaihekulma on sama, summataan virtojen magnitudit aritmeettisesti. Yksittäisten virtakomponenttien vaihekulmissa esiintyvä ero aiheuttaa summan, jonka suuruus on pienempi, kuin virtakomponenttien aritmeettisen summan suuruus. Ero summan suuruudessa voidaan nähdä virran joidenkin osien kumoutumisena. Samantyyppisten epälineaaristen kuormien yksittäisten virtakomponenttien vaihekulmaerot johtuvat kolmesta eri muuttujasta, jotka ovat verkosta otetun tehon suuruus, vaiheimpedanssin suuruus sekä vaiheimpedanssin reaktanssin ja resistanssin suhde. [5, 6, 8]

Kumoutuminen tapahtuu erityisesti järjestysnumeroltaan korkeilla harmonisilla yliaaltovirroilla. Sähköautojen tapauksessa kumoutumiseen vaikuttavien parametrien vaihteluun vaikuttavat sähköauton akustojen lataustaso, latauksen kesto tai latauksen aloitusaika. Myös latausprosessin ohjausalgoritmi vaikuttaa kumoutumiseen, sillä latausprosessin aikana latausvirran arvo vaihtelee. Latausprosessin loppua kohden latausvirta pienenee, mutta sen kokonaissärökerroin on silti korkea, jolloin kumoutumista ei tapahdu. Harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumisen taso siis muuttuu latauksen aikana, mikä tekee arvioimisesta vaikeaa. [6, 7]

Tutkimuksessa mitattiin harmonisten yliaaltojen summautumista verkkoon, kun autojen akustojen latausaste muuttui arvosta 0 % arvoon 100 %. Tekemällä mittaukset latausasteen täydellä vaihtelualueella oli tutkimuksessa mahdollista selvittää kaikki mahdolliset kuorman muutoksen vaikutukset sekä erilaisuudet virtojen aaltomuodoissa, jotka voivat ilmaantua akustojen latausasteen ja akustojen energian vastaanottoasteen vaihdellessa. Latausprosessin alussa, kun akuston latausaste on matala, laturi syöttää maksimivirtaansa. Tämä jatkuu niin pitkään, kunnes akuston jännite lähestyy määrättyä raja-arvoaan, jolloin latausvirta pienenee ja akuston energian vastaanottokyky vähenee. Lataus päättyy, kun akuston jännitteen raja-arvo saavutetaan, jotta akusto ei vaurioidu.

Kuvassa 1 esitetään neljän eri sähköauton (engl. EV, Electric Vehicle) latausvirtojen muutos akustojen latausasteen kasvaessa. Kuvaajasta huomataan eri latureiden erilaiset latausprosessit, jotka vaikuttavat omalta osaltaan harmonisten yliaaltojen käyttäytymiseen. Todisteena tästä on mittaus, jossa latausprosessin aikana tarkasteltiin 15. yliaallon käyttäytymistä latausasteen mukaisesti. 15. yliaallon virta pysyi latauksen aikana suhteellisen vakiona noin 0,025 ampeerissa kulman arvon pysyessä noin 300 asteessa. Latauksen loppua kohden virran suuruus kasvoi hieman 0,03 ampeeriin kulman laskiessa noin 280 asteeseen. [5, 6]



Kuva 1. Eri sähköautojen (engl. EV) latausvirrat akustojen latausasteen funktiona [5].

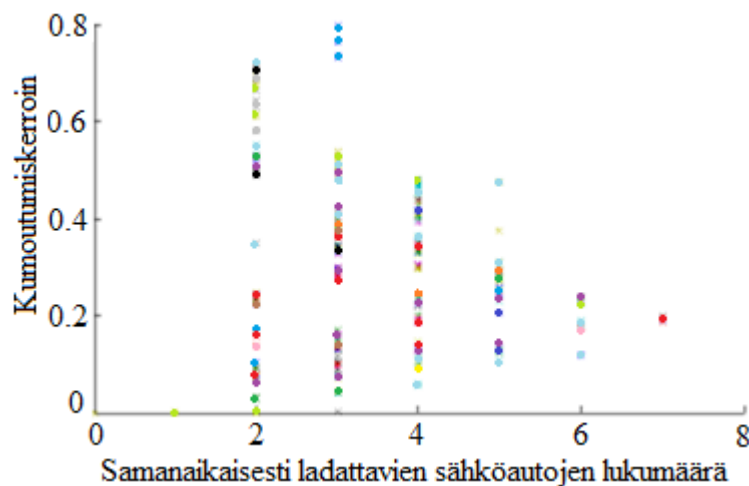
Suurin osa energiasta siirtyy akustoihin vaiheessa, jolloin latausvirta on vakio ja järjestelmä toimii nimellisvirralla [5]. Latausprosessin alun ja lopun latausvirran muutostila

ovat koko prosessin pituuteen suhteutettuna lyhyitä. Tällöin on syytä olettaa, että myös suurimmat vaikutukset kohdistuvat syöttävään sähköverkkoon, kun järjestelmä toimii nimellisvirrallaan. Tutkimuksessa selvitettiin myös jokaisen latausyksikön perustajuisen virran, kolmannen yliaallon sekä viidennen yliaallon suuruudet ja vaihekulmat. Perustajuisen virran vaihekulmat vaihtelivat eri latausyksiköillä 1 asteen ja 12 asteen välillä. Kolmannen yliaallon vaihekulmat vaihtelivat kuitenkin 25 asteen ja 352 asteen välillä virran ollessa noin yhden ampeerin molemmin puolin. Samansuuruiset vaihekulmaerot ovat myös viidennellä yliaallolla, jossa vaihekulman arvo oli välillä 25 ja 243 virran ollessa alle 0,4 A eri latausyksiköillä. Ladattaessa erilaisia sähköautoja vakiolla latausvirralla voidaan laskea kolmannen yliaallon arvon olevan 0,4 A, kun laskenta suoritetaan geometrisesti. Aritmeettisesti laskettuna arvo olisi 2,7 A. Laskenta suoritettaisiin aritmeettisesti, jos kaikki latausyksiköt ja siten vaihekulmat olisivat identtisiä. Viidennellä yliaallolla virta on geometrisesti 0,5 A ja aritmeettisesti 0,7 A. Tulokset todistavat, että kytkettäessä erilaisia latausyksiköitä verkkoon ja käytettäessä niitä vakiona pysyvänä latausvirralla, niiden aiheuttamat yhteenlasketut tietyn järjestysnumeron harmoniset yliaaltovirrat voivat olla jopa pienempiä verrattuna yhden latausyksikön aiheuttamiin vastaavan järjestysnumeron aiheuttamiin harmonisiin yliaaltovirtoihin.

Harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumista voidaan arvioida kumoutumiskertoimella K_{can} kaavan 2 mukaisesti. Kaava kuvaa järjestelmän virtojen todellista summaa suhteessa harmonisten yliaaltovirtojen aritmeettiseen summaan. Kaavassa N on yksittäisten kuormien lukumäärä, $I_{\text{RMS},h,\text{total}}$ on kaikkien järjestelmän kuormien yhteenlaskettu harmoninen yliaaltovirtakomponentti järjestysnumeroltaan h ja $I_{\text{RMS},h,n}$ on yksittäisen kuorman n harmoninen yliaaltovirtakomponentti, jonka järjestysnumero on h . K_{can} :n ollessa 1 harmoniset yliaaltovirrat ovat täysin kumoutuneet arvoon 0 A.

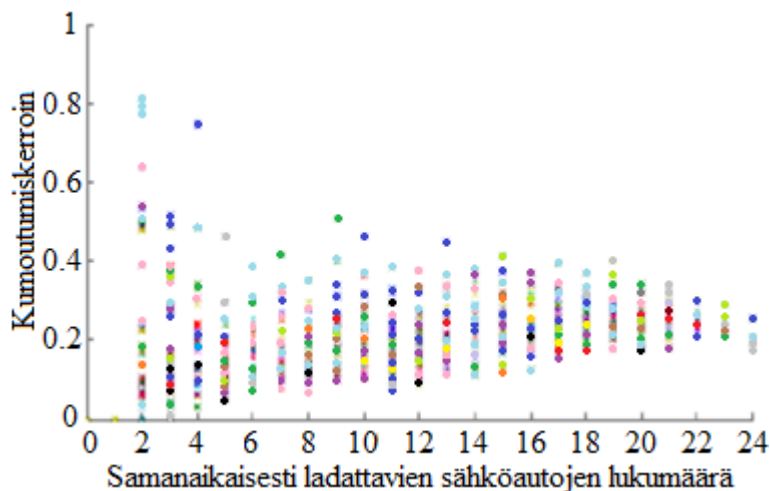
$$K_{\text{can}} = 1 - \frac{I_{\text{RMS},h,\text{total}}}{\sum_{n=1}^N I_{\text{RMS},h,n}} \quad (2)$$

Tutkimus ottaa esimerkiksi alueet, joissa on mahdollisesti 10 tai 50 sähköautoa kytkettynä lataukseen samanaikaisesti per alue. Alueella, jossa on 10 sähköautoa, on yleensä vähemmän kuin 7 sähköautoa latauksessa samanaikaisesti. Kuvassa 2 esitetty kolmannen yliaallon kumoutumiskertoimen histogrammi alle kymmenellä samanaikaisesti ladattavalla sähköautolla osoittaa, että kumoutumiskerroin saavuttaisi korkeimmat arvonsa, kun ladattavien sähköautojen määrä on vähäinen. Kuvan eriväriset pisteet kuvaavat kumoutumiskertoimen K_{can} havaittuja arvoja eri kombinaatioilla, kun ladattavien autojen tyyppi vaihtelee.



Kuva 2. Kolmannen yliaallon kumoutumiskertoimen histogrammi alle 10 samanaikaisesti ladattavalla sähköautolla [5].

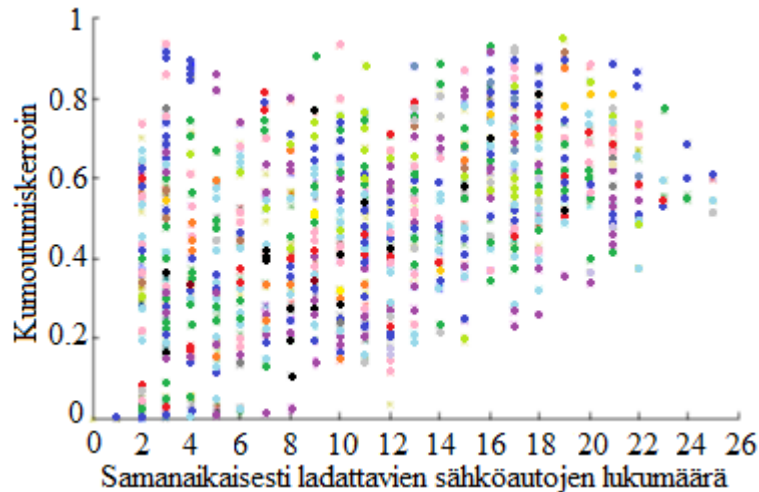
Sähköautojen lukumäärän samalla alueella ollessa 50, on niistä yleensä vain alle puolet aktiivisessa latauksessa samanaikaisesti. Kuvassa 3 esitetyssä histogrammissa kuvataan kolmannen yliaallon kumoutumista, kun alle 25 sähköautoa ladataan samanaikaisesti. Kumoutumiskerroin voi saada usein 0,6 yltäviä arvoja, mutta sitä suuremmat arvot vaativat harvinaisempia kombinaatioita sähköverkkoon samanaikaisesti yhdistetyistä latausyksiköistä. Pääsääntöisesti kumoutumiskertoimen arvo pysyy alle 0,3.



Kuva 3. Kolmannen yliaallon kumoutumiskertoimen histogrammi alle 25 samanaikaisesti ladattavalla sähköautolla [5].

Myös viidennen yliaallon kumoutumista selvitettiin käyttäen mittauksia 50 sähköauton alueelta. Kuvan 4 histogrammista nähdään, että eri kombinaatioiden suurempi lukumäärä tuottaa todennäköisesti suuremman kumoutumiskertoimen arvon. Kumoutumiskertoimen

arvoissa on huomattava ero verrattuna kolmannen yliaallon kumoutumiskertoimeen. Keskimääräisesti kumoutumiskertoimen arvo on yli 0,5. Verkkoon kytkettyjen latausyksiköiden määrän kasvaessa suurensi todennäköisesti myös kumoutumiskertoimen arvo.

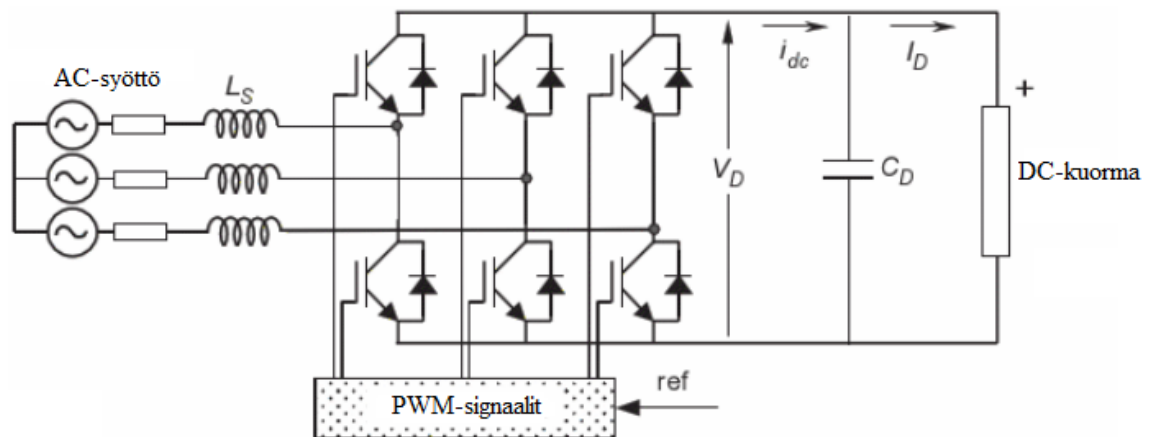


Kuva 4. Viidennen yliaallon kumoutumiskertoimen histogrammi alle 25 samanaikaisesti ladattavalla sähköautolla [5].

Tutkimuksen yhteenvedona voidaan karkeasti todeta, että useiden erilaisten sähköautojen latauksesta aiheutuvat kolmannet yliaaltovirrat kumoutuvat noin 30 prosenttisesti ja viidennet yliaaltovirrat noin 50 prosenttisesti. Harmonista kumoutumista tapahtuu myös tilanteessa, jossa samanlaisia latausyksiköitä on kytkettynä verkkoon, mutta niiden latausaste on erisuuruinen. Tämän työn kannalta edellä mainittu on tärkeää tietoa, sillä kuormien ollessa fyysisesti käytännössä samanlaisia, niiden verkosta ottama teho voi olla eri suuruista ja tasasuuntauksen ohjauksessa voi olla eroja.

2.3 Pakkokommutoidut tasasuuntaajat

Kuvassa 5 esitetyn kolmivaiheisen pakkokommutoidun tasasuuntaajan puolijohdekytkiminä käytetään hilaeristettyjä bipolaaritransistoreja (IGBT), joiden kommutointia eli virran siirtymistä puolijohteelta toiselle siltakytkennässä voidaan täysin ohjata päälle tai pois kytkemällä hilalle sopiva jännite, jolla ohjataan kollektorin ja emitterin välillä kulkevan virran suuruutta. Hilalle sopiva jännite generoidaan PWM-signaaleita syöttävällä ohjauspiirillä. Lyhenne PWM tulee sanoista pulse-width modulation, joka on suomennettuna pulssinleveysmodulaatio. [9]



Kuva 5. Kolmivaiheinen pakkokommutoitu tasasuuntaaja [9].

Transistorien kytkentänopeus on satoja kertoja yhden jakson aikana verrattuna luonnollisesti kommutoiiviin suuntaajiin, joissa esimerkiksi tyristorin kytkentä päälle tapahtuu jakson aikana vain kerran. Transistorien mahdollistaman tasasuuntaajan täydellisen ohjauksen etuihin kuuluu:

- Virta tai jännite voidaan moduloida pulssinleveysmodulaatiolla, mikä generoi vähemmän harmonisia yliaaltoja.
- Tehokerrointa voidaan hallita.
- Tasasuuntaaja voidaan rakentaa jännitelähde- tai virtalähdetyyppiseksi.
- Virran sekä jännitteen napaisuus voidaan kääntää. [9]

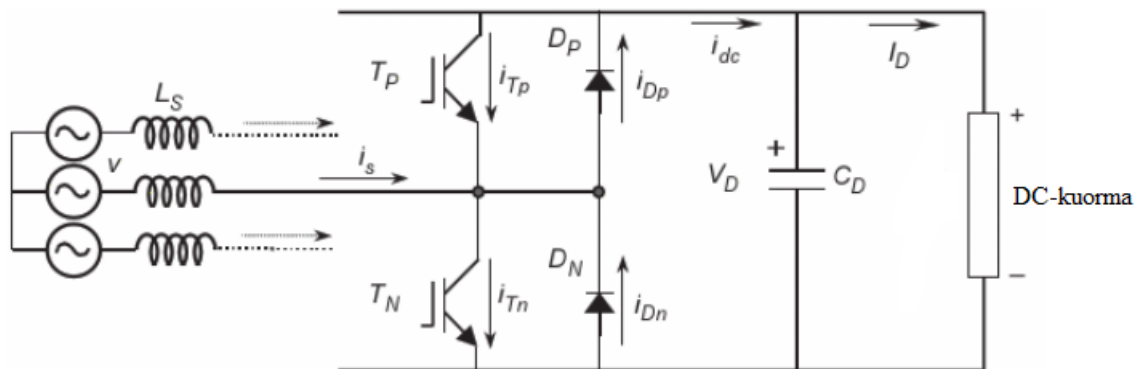
Jännitelähdetyyppinen pakkokommutoitu tasasuuntaaja on yleisemmin käytetty suuntaajamalli. Sen toiminta perustuu takaisinkytkentään, joka mittaa tasajännitepuolen jännitettä ja vertaa sitä haluttuun tasajännitteen asetusarvoon. Vertailun tuottaman eroarvon signaalia käytetään kääntämään transistorien tilaa päälle ja pois. Näin teho voi virrata kumpaankin suuntaan halutun tasajännitteen mukaisesti, joka mitataan kondensaattorin C_D navoista. [9]

Tasasuuntaajakäytössä virran I_D ollessa positiivinen kondensaattorin kapasitanssi C_D purkautuu ja säätimen eroarvosignaali pyytää syöttävästä vaihtosähköverkosta lisää tehoa. Ohjauspiiri ottaa puuttuvan tehon verkosta generoimalla sopivat pulssinleveysmodulaatiosignaalit transistoreille. Näin vaihtojännitepuolelta tuleva virta lataa DC-puolen kondensaattoria, jolloin sen jännite alkaa palautua huippuarvoonsa. Lyhenne DC tulee sanoista Direct Current, joka tarkoittaa tasavirtaa. Tasasuuntaajan toimiessa käänteisesti invertterinä virran I_D ollessa negatiivinen, kondensaattorin kapasitanssi C_D on ylilatautunut ja säätimen eroarvo pyytää ohjauspiiriä purkamaan kondensaattorin kapasitanssin C_D ja palauttamaan tehoa vaihtosähköverkkoon. [9]

Pulssinleveysmodulaatiolla ohjattu ohjauspiiri kytkee transistorien venttiilit auki tai kiinni ennalta määritellyn signaalin perusteella, joka voi olla esimerkiksi sinimuotoinen

virta- tai jännitesignaali. PWM generoi tämän sinimuotoisen signaalin kanssa samantaajuista modulaatiojännitettä, jonka amplitudia säädetään pulssinleveysmodulaation taa-juutta muuttamalla. PWM-signaalia siirtämällä voidaan säätää modulaatiojännitteen vaihekulmaa. Modulaatiojännitteen amplitudia ja vaihekulmaa muuttamalla syöttävän ver-
kon jännitteeseen verrattuna tasasuuntaaja voidaan muuttaa toimimaan invertterinä ja sa-
malla sen tehokerrointa voidaan säätää kapasitiivisen ja induktiivisen välillä. [9]

Pakkokommutoidun tasasuuntaajan yksittäisten komponenttien toimintaa voidaan sel-ventää kuvan 6 avulla, jossa positiivisen puolijakson aikana negatiivisella DC-puolella oleva transistori T_N kytkeytyy päälle, jolloin lähdevirta i_s kulkee sen läpi (i_{Tn}). Virta palaa lähteeseen DC-puolen negatiiviseen napaan kytketyn diodin kautta. Virta voi kulkea myös tasajännitekuorman kautta ja palata positiivisella DC-puolella olevan transistorin kautta, jolloin suuntaaja toimii käänteisesti. Transistorin T_N kytkeytyessä pois päältä vir-
ran kulkureitti katkeaa ja virta i_{Dp} alkaa kulkea positiivisella DC-puolella olevan diodin D_P kautta. Virta i_{Dp} menee suoraan suuntaajan DC-puolelle ja se on osa generoituvaa vir-
taa i_{dc} , joka lataa kondensaattorin kapasitanssia C_D ja mahdollistaa tasasuuntaajan tuotta-
man DC-tehon. Induktansseihin L_S indusoituvat jännitteet mahdollistavat diodin D_P joh-
tamisen. Negatiivisen puolijakson aikana suuntaajan toiminta on samanlaista, mutta joh-
tavat komponentit ovat transistori T_P ja diodi D_N . [9]



Kuva 6. Virtojen kulkusuunnat pakkokommutoidussa tasasuuntaajassa [9].

Pulssinleveysmodulaatiolla ohjattu tasasuuntaaja toimii kuten perinteinen diodisiltata-
suuntaaja, mikäli diodien generoima DC-jännitteen huippuarvo on suurempi kuin itse
DC-puolen jännite. Diodien johtamisen ollessa estettynä DC-puolen jännitteen suurem-
malla arvolla diodin saa johtavaksi vain tilanteessa, jossa vähintään yksi transistoreista
on päällä-tilassa ja vaihtojänniteverkon jännite on suotuisa. DC-puolen jännitteen tar-
peeksi korkean arvon ylläpitämisen ohjaus vaatii takaisinkytkennän. [9]

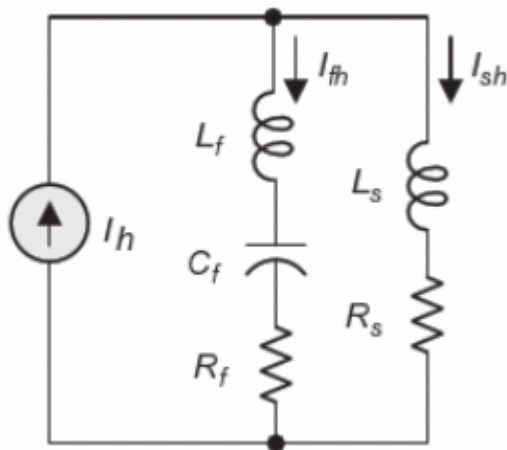
2.4 Suotimet

Sähköverkkoon kytkettyjen tehoelektroniikkaan perustuvien laitteiden määrän kasvu vai-
kuttaa merkittävästi sähkön laatuun jakeluverkossa. Sekä isotehoiset teolliset kuormat,
että kotona käytettävät laitteet tuottavat harmonisia yliaaltoja sähköverkkoon. Samaan

aikaan monet harmonisia yliaaltoja tuottavat laitteet ovat herkkiä siniaallosta poikkeavalle jännitteelle. Ongelmat sähkön laadussa voivat olla peräisin itse syöttävästä sähköverkosta tai ne voivat olla käyttäjän aiheuttamia. Tässä luvussa esitellään passiivisten sekä aktiivisten suotimien toimintaa.

2.4.1 Passiiviset suotimet

Passiivinen suodin voidaan virittää suodattamaan hallitsevin kuormavirran harmoninen yliaalto sekä suunnitella parantamaan tehokerrointa. Passiivisen LC-suotimen yksivaiheinen ekvivalenttipiiri esitetään kuvassa 7, jossa kelan induktanssin L_f ja kondensaattorin kapasitanssin C_f sarjaankytkentä on kytketty epälineaarisen virtalähteen I_h sekä syöttävän sähköverkon rinnalle. [9]

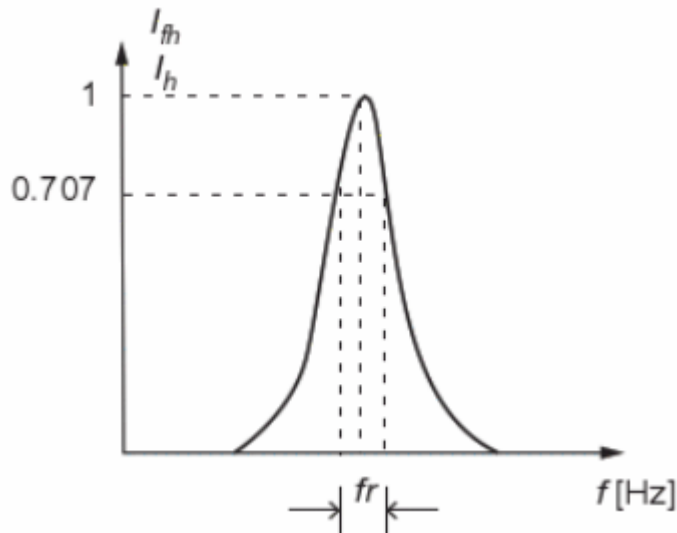


Kuva 7. Passiivinen LC-suodin [9].

Passiivisen suotimen toimintaperiaate perustuu harmonisen virtakomponentin I_{fh} virtaamiseen suotimen läpi siten, että kelan induktiivinen reaktanssi on yhtä suuri kuin kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi, jolloin reaktanssit kumoavat toisensa ja syntyy resonanssi. Resonanssitaajuudella suotimen sähköinen vastusarvo koostuu vain resistanssista ja sen ollessa nolla suodin on oikosulussa. Taajuus f_r , jolle resonanssi syntyy, määräytyy kondensaattorin C_f ja kelan L_f koosta kaavan 3 mukaisesti. [9]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (3)$$

Suotimen resonanssitaajuuden ollessa viritettynä hallitsevan harmonisen yliaallon taajuudelle syöttävään verkkoon kulkeutuu tällöin virta I_{sh} , josta hallitseva harmoninen yliaalto on suodatettu pois. Passiivisen suotimen kaistanleveys, jolla kuvataan suotimen toimintaa eri taajuuksilla, esitetään kuvassa 8. [9]



Kuva 8. Passiivisen suotimen kaistanleveys [9].

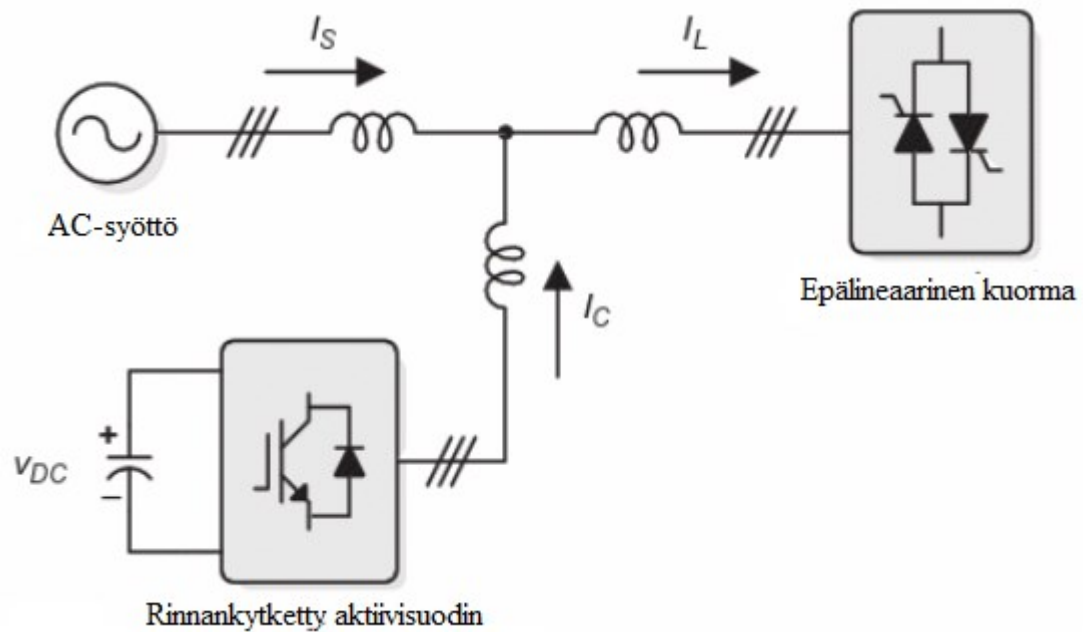
Kaistanleveys on määritelty ylemmän ja alemman rajataajuuden avulla. Näillä rajataajuuksilla suotimen virtavaimennus on -3 dB. Mitä enemmän suotimen resonanssitaajuus poikkeaa suodatettavan harmonisen yliaaltovirran taajuudesta, sitä suurempi sen sähköinen vastusarvo on ja sen kyky suodattaa kyseistä harmonista yliaaltovirtaa on heikompi. [9]

2.4.2 Aktiiviset suotimet

Perinteiset suodinlaitteistot ovat osoittautumassa riittämättömiksi sähkön laadun ongelmien lieventämisessä uusien tehoelektroniikkasovellusten määrän kasvaessa. Harmoninen särö on perinteisesti minimoitu passiivisten LC-suotimien avulla. Passiivisten suotimien käyttö harmonisten yliaaltojen vähentämiseen voi kuitenkin aiheuttaa muun muassa rinnakkaisresonansseja sähköverkon impedanssin kanssa sekä reaktiivisen tehon ylikompensaatiota verkon perustaajuudella. [9]

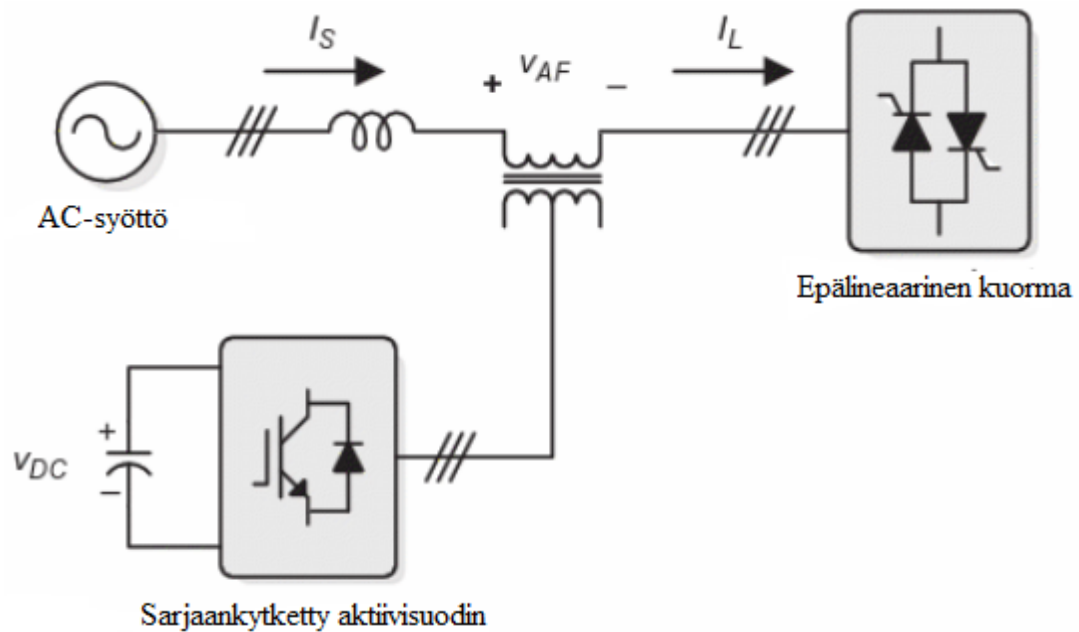
Ongelmat sähkön laadussa ovat johtaneet dynaamisten ja säädettävien ratkaisujen kehittämiseen sähkön laadun parantamiseksi. Tällaisia ratkaisuja kutsutaan aktiivisiksi suotimiksi ja ne voivat kompensoida virta- ja jänniteharmonisia sekä loistehoa, säädellä järjestelmän jännitettä, estää välkyntää ja parantaa jännitetasapainoa kolmivaihejärjestelmissä. Aktiivisten suotimien etuja ovat automaattinen mukautuminen verkon muutoksiin ja kuorman vaihteluihin. Ne voivat myös suodattaa monia harmonisia yliaaltoja samanaikaisesti, eikä niitä käytettäessä pääse syntymään resonansseja suotimen ja verkon impedanssin välille. Lisäksi aktiivisten suotimien tilantarve on pienempi verrattuna perinteisiin passiivisiin suotimiin. Aktiivisia suotimia on markkinoilla kolmea eri tyyppiä, jotka ovat rinnalle ja sarjaan asennettavat suotimet sekä hybridisuodin. Edellä mainitut aktiivisuotimet ovat pulssinleveysmodulaatiota hyödyntäviä inverttereitä, jotka toimivat joko epäsinimuotoista virtaa syöttävinä virtalähteinä tai jännitelähteinä. [9]

Kuvassa 9 esitettyä rinnankytkettyä aktiivisuodinta käytetään yleisesti kompensoimaan harmonisia yliaaltovirtoja, reaktiivista tehoa sekä epäsymmetrisiä kuormavirtoja. Sitä voidaan käyttää myös staattisena loistehogeneraattorina, joka pienentää virran ja jännitteen vaihekulmaeroa. Sen toiminta perustuu epälineaarisen kuorman generoimien harmonisten yliaaltovirtojen tunnistamiseen ja 180 astetta vastakkaisvaiheisten yliaaltovirtojen syöttämiseen järjestelmään, jolloin yliaaltovirrat kumoavat toisensa. Näin verkon syöttövirta pysyy sinimuotoisena ja samanvaiheisena verrattuna kyseisen vaiheen vaihejännitteeseen, kun suotimella kompensoidaan myös kuorman tehokerrointa. Tällöin koko järjestelmä näkyy syöttävälle sähköverkolle vain ideaalisena vastuksena. [9]



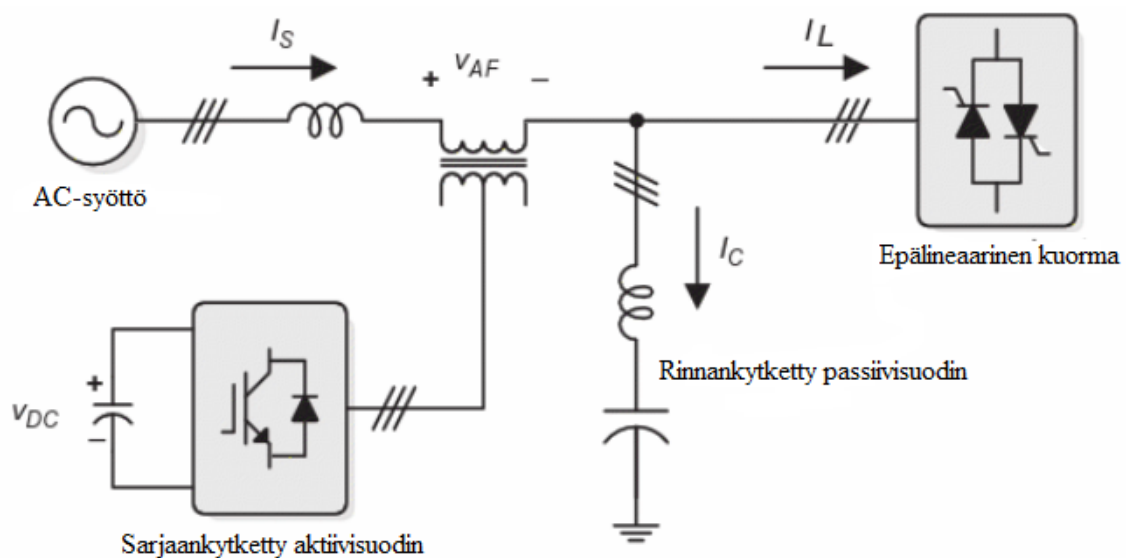
Kuva 9. Rinnankytketty aktiivisuodin [9].

Kuvassa 10 esitetty sarjaankytketty aktiivisuodin on kytketty syöttävän verkon kanssa sarjaan muuntajan kautta eliminoidakseen jännitteen harmoniset yliaallot sekä tasapainottaakseen ja säätääkseen kuorman jännitettä. Sarjaan kytketty aktiivisuodin on sopiva suojaamaan kuluttajaa sopimattomalta verkon syöttöjännitteeltä, kuten esimerkiksi jännite-epätasaisuuksilta, jännitteen säröytymiseltä sekä jännitekuopilta. Sen toiminta perustuu verkon syöttöjännitteen kanssa sarjaan syötettyyn jännitekomponenttiin, jolla kompensoidaan kuorman puolella tapahtuvia jännite-epätasaisuuksia. Jännitekomponentti generoidaan jännitelähdeinvertterillä, jota ohjataan pulssinleveysmodulaatiolla. [9]



Kuva 10. Sarjaankytketty aktiivisuodin [9].

Kuvassa 11 esitetty hybridisuodin on yhdistelmä aktiivista ja passiivista suodinta ja se on käytännöllinen suuritehoisissa järjestelmissä, sillä aktiivisen suotimen teholuokitusta voidaan pienentää merkittävästi passiivisen LC-suotimen suodattaessa pienten järjestyslukujen harmoniset virtayliaallot. Mikäli passiivista suodinta ei ole viritetty toimimaan optimaalisella taajuudella, vaaditaan aktiivisuotimen teholuokitukselta suurempaa arvoa sen suodattaessa suurimman osan harmonisista yliaalloista. Passiivisuotimen ollessa kytkettynä rinnan, sarjaankytketty aktiivisuodin toimii harmonisena erottimena pakottaen kuorman generoimien harmonisten yliaaltovirtojen virtaamaan pääosin passiivisen suotimen kautta syöttävän sähköverkon sijaan. [9]



Kuva 11. Hybridisuodin [9].

Passiivisuotimen huonoja puolia, kuten esimerkiksi tarkan viritystaajuuden asettamista ja siten kykyä suodattaa suuri osa harmonisista yliaalloista, voidaan vähentää kytkemällä järjestelmään lisäksi sarjaankytketty aktiivisuodin. Aktiivisuodin tekee verkkovirrasta sinimuotoista ja samanvaiheista verrattuna kyseiseen vaihejännitteeseen parantaen siten passiivisuotimen kompensointiominaisuuksia. [9]

2.5 Keskijännitejakeluverkko

Keskijänniteverkko on osa sähkönjakelujärjestelmää, jonka tehtävänä on siirtää sähkövoimansiirtojärjestelmän kautta tuleva voimalaitosten tuottama sähkö kuluttajille. Tuotantoa voidaan hajauttaa myös keskijännitteiselle jakeluverkkotasolle. Keskijänniteverkon sähköasema on sähkönjakeluverkon tärkein yksittäinen rakenneos, jossa siirtoverkon 110 kilovoltin korkeajännite muunnetaan Suomessa 20 kilovoltin tasolle. Sähköasemalla sijaitsevat muun muassa verkon mittaus- ja suojalaitteistot, kuten suojareleet sekä muut automaatiokomponentit. Sähköaseman sijainnilla ja koolla on suuri merkitys keskijännitekaapeleiden sekä ilmajohtojen pituuksiin, mitoituksiin ja varayhteyksiin. Keskijänniteverkko on topologiaaltaan monin osin silmukoitu, mutta sitä käytetään säteittäisenä muun muassa suojauksen konfiguroinnin helpottamiseksi. [10]

Sähköaseman rakenne käsittää suurjännitekytkinlaitoksen, yhden tai useamman päämuuntajan, keskijännitekytkinlaitoksen sekä apujännitejärjestelmän käyttökäyttötoimintoihin. Kytkinlaitoksia on rakenteeltaan erilaisia ja haja-asutusalueella käytetään perinteisiä ilmaeristeisiä yksiköitä, kun taas tiheämmin asutuilla alueilla käytetään SF₆-kaasulla eristettyjä yksiköitä. Eristekaasun käyttö mahdollistaa kytkinlaitoksen rakenteen pienentämisen, sillä jännitteelliset osat ovat hermeettisesti suljetussa maadoitetussa metallikotelossa, joka on kosketus- ja valokaarisuojattu sekä jaettu erillisiin kaasutiloihin vikojen vaikutusten rajoittamiseksi. Keskijännitekytkinlaitos muodostaa sähkönsyöttötien päämuuntajan ja keskijännitelähtöjen välille. [10]

Yhden päämuuntajan sähköasemalla kiskojärjestelmänä käytetään yksikisko- tai kiskoapukiskojärjestelmää. Teknisesti nämä kaksi eroavat siten, että kiskoapukiskojärjestelmässä pääkiskona toimivan kokoojakiskon jokainen katkaisijalähtö on ohitettavissa apukiskolta erottimen välityksellä. Myös jokaisen katkaisijan kummallakin puolella on erotin. Esimerkiksi katkaisijaa huollettaessa sähkön syöttöreitti kulkee kiskokatkaisijan kautta, joka kytkee kiskot toisiinsa. Yksikiskojärjestelmä on halpa ja selväpiirteinen, mutta muun muassa kuormitusten ryhmittely sekä kiskoston huoltaminen ovat haastavampia verrattuna kiskoapukiskojärjestelmään, jossa niin sanotun kiskokatkaisijan avulla voidaan korvata toinen katkaisija esimerkiksi huollon ajaksi. Yksikiskojärjestelmäänkin saadaan joustavuutta esimerkiksi jakamalla kiskosto osiin pitkittäiskatkaisijalla tai erottimella. Kiskoapukiskojärjestelmän hyötyihin kuuluvat muun muassa vain kytkentätoimenpiteiden pituiset keskeytysajat, helpompi huollettavuus sekä kasvanut käyttövarmuus. [10, 11]

Tyypillisesti käytetään myös kaksikatkaisija- eli duplex-järjestelmää, jossa jokaista lähtöä kohden on 2 katkaisijaa, joista toinen on varalla. Duplex-järjestelmän etuihin kuuluvat muun muassa käytön ja huoltojärjestelyjen yksinkertaisuus sekä erittäin suuri käyttövarmuus jopa kiskovikojen suhteen. Haittapuolena on kaksinkertaisesta komponenttimäärästä johtuva korkea hinta, mutta käytettäessä nykyaikaisia kennokojeistoja, missä erotus tehdään vetämällä vaunukatkaisija ulos, voidaan lähdöille yhteisiä varakatkaisijoita siirtää käytettävään johtolähtökennoon ja näin säästää katkaisijoiden määrässä. Johtolähtökenno koostuu katkaisijasta, virtamuuntajista tai sensoreista relesuojausta ja mittareita varten sekä erottimesta, joka siis voidaan korvata poisvedettävän vaunukatkaisijan il-mavälillä. Releistyksen sekä energiamittauksen vaatima jännitetieto mitataan kiskosta yleensä erillisellä jännitemittauskennolla. [10, 11]

Tyypilliset päämuuntajakoot keskijänniteverkossa ovat noin 10-40 MVA. Keskijänniteverkon oikosulkuvirtoihin muuntajilla on vaikutuksensa, sillä muuntajan nimellistehon kasvaessa sen impedanssi pienenee ja siten mahdollistaa suuremman oikosulkuvirran arvon. Tavanomaisesti päämuuntajan maksimikuormitusaste on noin 60-80 % nimellistehosta, sillä muuntajan kapasiteetista on varattava osuus muiden samaa keskijänniteverkkoa syöttävien muuntajien vikatilanteita varten. Päämuuntajan yläjännitekäämin yhteydessä on tyypillisesti käämikytkin, jonka avulla alajännitepuolen jännite voidaan pitää vakiona riippumatta yläjännitepuolen jännitetasosta sekä muuntajan kuormituksesta. [10]

Keskijänniteverkko on joko sammutettu muuntajalla sijaitsevan sammutuskuristimen kautta tai maasta erotettu. Maasta erotetussa verkossa verkon nollaimpedanssi on hyvin suuri, sillä se muodostuu vain verkossa galvaanisesti yhteen kytkettyjen johtojen maakapasitansseista. Maasulkuvirta on tällöin hyvin pieni verrattuna kuormitusvirtaan. Verkko on sammutettu, kun sammutuskuristimen induktanssi mitoitetaan siten, että johtojen maakapasitanssien kautta kulkeva maasulkuvirta kumoutuu ja maasulku sammuu itsestään. [10]

2.6 Keskijänniteverkon suojaus

Keskijänniteverkon yksi erityispiirteistä on säteittäinen syöttötapa, joka yksinkertaistaa selektiivisen suojauksen toteuttamista. Toinen erityispiirre on nollajohtimen puuttuminen, jonka ansiosta maasulun havaitseminen ja paikantaminen vaativat oman tekniikkansa. Sähköaseman keskijännitelähtö on suojattu katkaisijalla, johon on liitetty ylivirta, maasulku- ja jälleenkytkentäreleet. Kaapeliverkossa pikajälleenkytkentää ei käytetä, sillä se on hyödyllinen vain ohimenevien valokaarivikojen sammuttamisessa. [10]

Päämuuntajan suojauksena käytetään differentiaali- ja ylivirtareleitä, joista differentiaalisuoja sisältää toiminnot muuntajan sisäisten vikojen tunnistamiseen. Näihin vikoihin kuuluu oikosulku, maasulku, käämisulku ja kierrossulku. Muuntajan tärkeänä suojana toimii myös virtauslaukaisulla varustettu kaasurele, joka toimii usein nopeimmin vakavissa muuntajan sisäisissä vioissa. [10]

2.6.1 Ylivirtasuojaus

Keskijänniteverkon oikosulku- tai ylivirtasuojauksen tavoitteena on ehkäistä oikosulkuvirran johdoille ja laitteille aiheuttamat lämpenemisvauriot sekä erottaa vioittunut johtosa verkosta. Ylivirtasuojaus takaa myös järjestelmän turvallisuuden käyttäjille sekä ulkopuolisille vikatilanteissa. Tähän tarkoitukseen käytetään yleensä vakioaikaylivirtarelettä. Ylivirtareleissä on yleisesti 3 eri toimintaperiaatetta. Hetkellisessä toimintaperiaatteessa ei releen toiminta-aikaa ole tarkoituksellisesti hidastettu. Vakioaikaisessa toimintaperiaatteessa taas voidaan asettaa releen havahtumisesta laukaisuun kuluva aikaa. Käänteisaikaisessa toimintaperiaatteessa laukaisuaika määräytyy virran perusteella tietyn asettelun rajoissa. [10, 11]

Kaapeliverkossa ylivirtareleeseen täytyy havahtua viimeistään kaapelien kuormitettavuuden tullessa vastaan. Hetkellislaukaisulla voidaan lyhentää syvien jännitekuoppien kestoaikaa sekä varmistaa, etteivät sähköaseman läheisten johto-osien oikosulkukestoisuudet ylitä. Sitä käytetään myös sähköaseman pääkatkaisijassa suojaamaan kiskostoa mahdollisissa kiskosto-oikosuluissa. Sähköaseman pääkatkaisijan hetkellislaukaisu ei saa toimia keskijännitelähdön vikaannuttua, vaan lähdön suojaus havahtumisen täytyy estää sähköaseman pääkatkaisijan laukeaminen, jotta suojaus toimii selektiivisesti. Hetkellislaukaisun asetteluarvo on yleensä kiloampeeriluokassa. Aikahidastettu sähköaseman pääkatkaisija toimii kuitenkin varasuojana keskijännitejohtolähdöille. Keskijännitejohdoilla voi olla katkaisijoita myös muuallakin kuin syöttävän sähköaseman kennoissa. Jotta ylivirtasuojaus toimii aikaselektiivisesti, on kyseiseen niin sanottuun välikatkaisijaan asetettava lyhyempi laukaisuaika kuin kennon katkaisijaan. [10]

Releen havaittua vian, se laukaisee katkaisijan hyvin nopeasti yleensä noin 0,1 sekunnissa. Jos suojauksessa käytetään pikajälleenkytkentää, lähtö on pois päältä noin 0,2 sekuntia. Mikäli vika verkolla ei poistu poiskytkennän aikana, laukaistaan katkaisija jälleen releen hidastusajasta riippuen alle sekunnissa, jonka jälkeen aikajälleenkytkentä tapahtuu kahden minuutin kuluttua. Johtolähtö katkaistaan lopullisesti syöttävästä verkosta alle sekunnissa, mikäli vika verkolla ei vielä ole poistunut. [10]

2.6.2 Maasulkusuojaus

Suomessa keskijänniteverkon maadoitustapana käytetään tähtipisteestään maasta erotettua verkkoa tai niin sanottua sammutettua verkkoa, jossa verkon tähtipisteeseen kytketään induktanssi, jonka reaktanssi vastaa suunnilleen verkon johtojen maakapasitanssin muodostamaa reaktanssia. Maasta erotettua keskijänniteverkkoa käytetään pääosin huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuvan kosketusjänniteongelman vuoksi. Vaihejohtimen valokaari tai kosketus suojamaadoitettuun osaan ovat maasulkuvikojen pääasiallisia aiheuttajia. Kosketusjännitteen suuruus riippuu tällöin maasulkuvirrasta sekä suojamaadoituksen resistanssista. Kosketusjännitteelle on määrätty raja-arvot standardissa SFS 6001 ja niihin

voidaan päästä parantamalla maadoituksia, lyhentämällä katkaisijan laukaisuaikaa vikatilanteessa sekä pienentämällä maasulkuvirtaa jakamalla verkko galvaanisesti erillisiin osiin tai käyttämällä sammutuskuristinta. [10]

Sammutetun verkon sammutuskuristimella pienennetään maasulkuvirran arvoa ja loivennetaan vikapaikan palaavaa jännitettä. Verkon maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summa täytyy olla likimain sama kuin sammutuskuristimen kautta kulkeva virta, mikä vaikuttaa sammutuskuristimen viritykseen. Maakapasitanssien kautta kulkevat virrat ovat vastakkaissuuntaisia sammutuskuristimen kautta kulkevan virran kanssa. Näin vikavirran jäljelle jäävä osuus koostuu vain resistiivisestä osasta, joka riippuu tähtipistejännitteestä, sammutuskuristimen sijaiskytkennän resistiivisestä osasta, johtimien resistansseista sekä verkon resistiivisistä vuotovirroista. [10]

Maasulkuvian aikana maasta erotetun verkon tähtipisteen sekä jokaisen vaiheen jännitteet muuttuvat ja eri puolilla verkkoa esiintyy johtojen maakapasitanssien kautta kulkevia kapasitiivisia vikavirtoja. Maasulkuvirran kulkureitti on vikapaikasta maahan yleensä vikaresistanssin kautta, josta se kulkee maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta päämuuntajan käämityksiin ja sitä kautta viallisen vaiheen impedanssin läpi vikapaikkaan. [10]

Maasulun aikainen vikavirran suuruus riippuu päämuuntajan perään galvaanisesti yhteen kytketyn verkon laajuudesta ja tyypillisesti sen arvo on alle 100 A. Maakaapeleiden maakapasitanssit ovat huomattavasti suuremmat verrattuna avojohtoihin tuottaen kaapelityypistä riippuen muutaman ampeerin maasulkuvirtaa per kilometri. Maasulun vikaresistanssin ollessa nolla ohmia, viallisen vaiheen jännite on myös nolla. Tällöin terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat pääjännitteen suuruiseksi ja verkon tähtipistejännite kasvaa vaihejännitteen suuruiseksi. Maasulkuvirta ja tähtipistejännite pienentyvät vikaresistanssin kasvaessa, mikä vaikeuttaa maasulkusuojauksen toteuttamista vikaresistanssin ollessa lähellä verkon normaalitilan vuotoresistanssia. Maasulkuvirta aiheuttaa vikapaikan maadoitusresistanssissa maadoitusjännitteen, joka aiheuttaa ihmisten tai eläinten kosketeltavissa olevan kosketusjännitteen. SFS 6001 -standardin kosketusjännitteen raja-arvot riippuvat laukaisuajan nopeudesta, jolloin esimerkiksi 1 sekunnin laukaisuajalla sallitaan 110 V kosketusjännite. [10]

Maasulkusuojauksia ei voida toteuttaa ylivirtasuojilla, sillä vikavirta on yleensä kuormitusvirtaakin pienempi. Maasulku voidaan havaita tarkastelemalla esimerkiksi perustajuisten tähtipiste- ja vaihejännitteiden muutosta, perustajuista summavirtaa tai virran ja jännitteen yliaaltoja. Suojaus toteutetaan suuntareleillä, jotka mittaavat maasulun aiheuttamaa vaihevirtojen epäsymmetriaa sekä tähtipistejännitteen kasvamista. Vaihevirtojen epäsymmetriaa kuvataan nollavirralla, jonka muodostaa johtolähdön kolmen vaiheen virtamuuntajien summakytken tai kaapelivirtamuuntajan vaihevirtojen osoitinsumma. [10]

Suojarele seuraa tähtipistejännitteen arvoa vaihejännitteisiin kytkettyjen avokolmiokytkentäisten jännitemuuntajien toisiokäämistä ja sen tulee havahtua maasulun tapahduttua vain kyseisen releen suojaamalla lähdöllä, mikäli nollavirta sekä tähtipistejännite ylittävät tietyt asetteluarvot. Avokolmiokytkennässä kolmioon kytketyn jännitemuuntajan yksi kulma jätetään avoimeksi, josta nollajännite voidaan mitata. Summavirtamuuntajan mitaama nollavirta vioittuneen lähdön alkupäässä on maakapasitanssien vaikutuksesta pienempi kuin vikapaikan maasulkuvirta. Maakapasitanssien määräämä vikavirran komponentti kulkee summavirtamuuntajan läpi molempiin suuntiin, joten vioittuneella lähdöllä niiden vaikutus on vähennettävä alkupään summavirtaa laskettaessa. [10]

Maasulun tapahtuessa lähdöllä suuri osa vikavirrasta kulkee toisen lähdön maakapasitanssin kautta sähköaseman kiskostoon, josta se kulkee vikaantuneelle lähdölle. Vikaantuneella lähdöllä sijaitsevan releen havahtumisehtona pitää näin olla nollavirran suunta summavirtamuuntajan kautta vikapaikkaa kohti eikä sähköaseman kiskostoon päin. Maasulun kesto voidaan asettaa releellä porrastetusti virran suuruudesta riippuen. [10]

3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksessa tarkastellaan Euroopassa sekä Pohjois-Amerikassa sijaitsevien konttiterminalien sähkösuunnitelmia, joista erityisesti yksittäisiä keskijänniteverkon sähköasemia, johon tulevaisuudessa on tarkoitus liittyä uudentyyppisellä ja muista eroavalla epälineaarilla kuormalla. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää sähköverkon ominaisuudet liitännäspisteessä ja niiden avulla selvittää tulevaan kytkentään tarvittavat komponentit, suojaustavat ja -asettelut. Tutkimuksen lisäksi tehdään mittauksia, joissa selvitetään tässä luvussa esiteltävän epälineaarisen kuorman sähköverkkoon tuottamat harmoniset yliaallot.

3.1 Maanosakohtaisten konttiterminalien keskijänniteverkot

Tutkittavana kohteena Euroopassa on suurikokoinen konttiterminali, jonka konttiliikennettä käsitellään yli 70:llä nosturilla ja 40:llä lukilla. Tutkimukseen käytettävä materiaali käsittää kyseisen alueen sähkösuunnitelman, joka sisältää tietoa muun muassa alueen sähköverkon käytöstä, käytettävistä komponenteista, topologiasta, kuormituslaskelmista, vikavirroista sekä releiden suojausasetteluista.

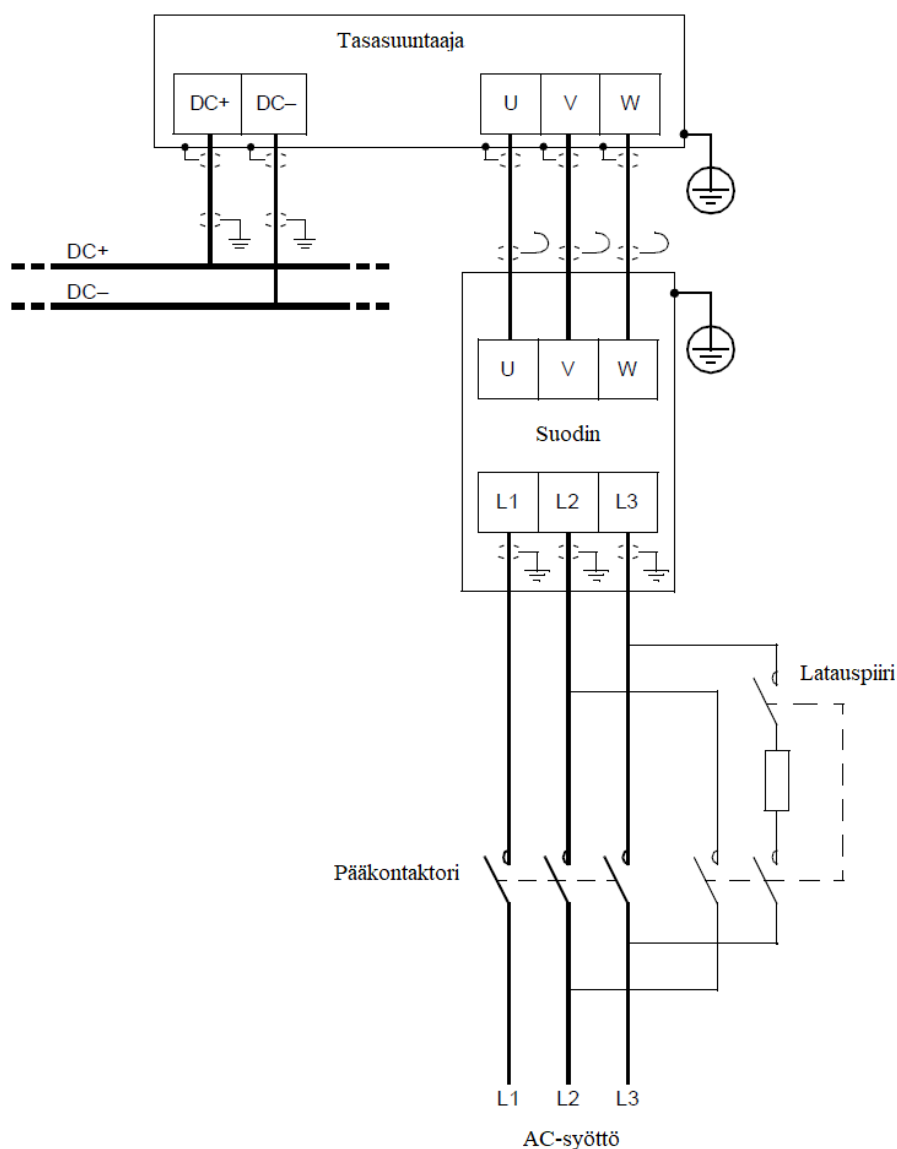
Tutkimuskohteena oleva Pohjois-Amerikan esimerkki käsittää laajuudeltaan yli 40 nosturia ja noin 30 lukkia. Tutkimukseen käytettävä materiaali sisältää konttiterminalialueen sähkösuunnitelman, joka sisältää hyvin pitkälti samankaltaista tietoa kuin eurooppalaisen konttiterminalin sähkösuunnitelma pois lukien kuormituslaskelmat ja releiden suojausasettelut.

3.2 Epälineaarinen kuorma

Konttiterminalien keskijänniteverkkoon keskijännitemuuntajan kautta liitettävä epälineaarinen kuorma on monipuolinen muunninmoduuli, jota käytetään tämän työn sovelluksessa tasasuuntaajana. Kyseisen mallin jatkuva lähtövirta on 45 °C lämpötilassa 647 A ja hetkellinen huippuvirta 900 A, kun syöttöjännite on 230-515 V. Nimellisjännite laitteella on 500 V. Ulostulotaajuus voidaan säätää välillä 0-1000 Hz. Virta tasasuunnataan hyödyntämällä IGBT-komponentteja ja laite on mahdollista ohjelmoida toimimaan eri moodeissa, kuten esimerkiksi DC/DC-moodissa. DC/DC-moodi on laitteen toimintatila, jossa se muuntaa esimerkiksi tasajännitelähteestä syötetyn 500 V tasajännitteen komponenteille sopivaksi 300 V tasajännitteeksi. Laitteen ohjaussignaaleina käytetään muun muassa ohjelmoitavan logiikkakontrollerin digitaali- ja analogiasignaaleja.

Kolmivaiheiseen vaihtosähköverkkoon kytkettäessä moduulin vaihtosähköpuolelle asennetaan lisäksi saman valmistajan toimittama suodin kuvan 12 mukaisesti. Kyseinen LCL-

suodin sisältää 2 kela per vaihe ja yhden kondensaattorin per vaihe kelojen välissä. Lyhenne LCL tulee siihen käytettävien komponenttien sähköisten suureiden symboleista, jotka ovat kelan induktanssille L ja kondensaattorin kapasitanssille C. Lyhenne kertoo myös komponenttien lukumäärän sekä asennustavan suotimessa, jossa on invertterin puoleisen ja syöttävän verkon puoleisen kelan väliin kytketty kondensaattori. Suotimen tarkoitus on suodattaa harmoniset yliaaltovirrat, joita IGBT-tasasuuntaaja synnyttää vaihtotaajuuksillaan.



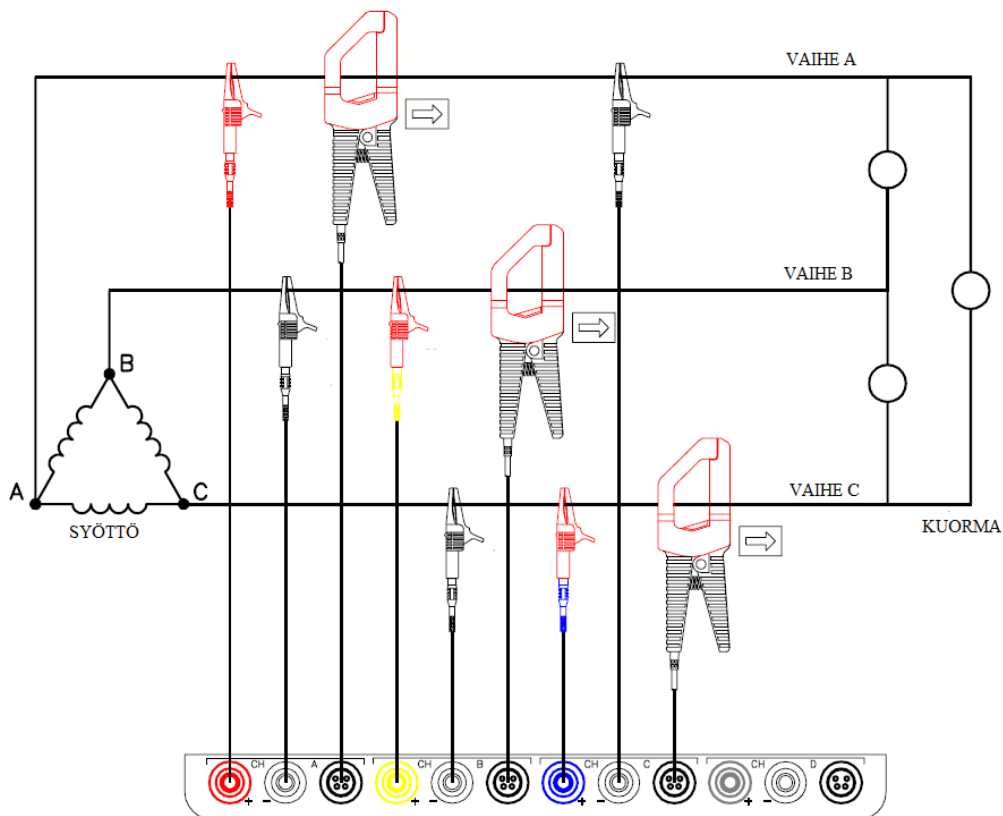
Kuva 12. Tasasuuntausmoduulin ja suodinyksikön kytentäkaavio.

Muunninmoduuli sekä suodin ovat osa suurempaa kokonaisuutta, jota tässä työssä ei tulla esittelemään tarkemmin. Tasasuuntauskokonaisuus tullaan liittämään konttiterminaalien sähköasemiin maakaapeloinnilla. Tämän diplomityön yksi tavoitteista on selvittää, miten yllä kuvatun tasasuuntauskokonaisuuden aiheuttamat haitat sähkön laatuun summautuvat, kun järjestelmiä kytketään verkkoon useita. Aihe käsitellään olemassa olevan teorian

sekä jo tehtyjen tutkimuksien avulla. Yliaaltovirtojen summautumistavasta sähköverkossa esitetään lopuksi arvio.

3.3 Mittausmenetelmät

Mittauksen tavoitteena on määrittää epälineaarisen kuorman aiheuttamat harmoniset yliaallot syöttävään sähköverkkoon. Mittaus tehdään Kalmarin testikentällä Tampereen Ruskossa, jossa kyseinen järjestelmä on kytkettynä verkkoon. Mittaukseen käytetään sähkön laadun tarkkailuun tarkoitettua Dranetz PowerXplorer PX5 -mittalaitetta. Mittauskytkentä on kuvan 13 mukainen kolmivaiheinen kolmiokytkentä kelluvalla nollapisteellä.



Kuva 13. Mittauskytkentä [12].

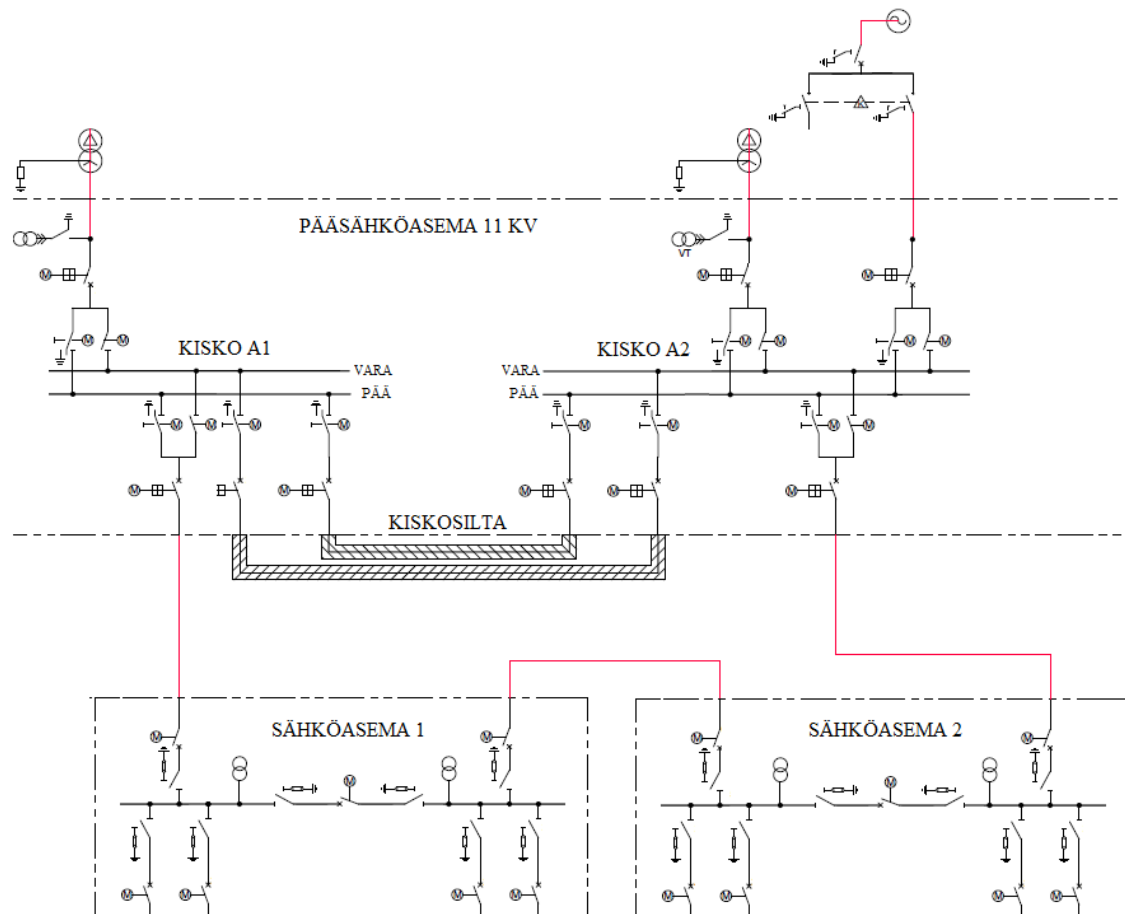
Mittauspiste on kuvan 12 mukaista epälineaarista kuormaa syöttävän muuntajan ensiöpuolella kuvan 13 kuorman ollessa siten muuntajan ensiö. Mittariin kytketyt Fluke i1000s -virtapihdit asetetaan 1000 A mittausalueelle. Mittaukset tehdään kuorman täydellä sekä puolikkaalla teholla ja yhden mittauksen kesto on noin 10 minuuttia. Mittarin monitorointimoodina käytetään EN50160 Power Quality -moodia. Mittausdataa tarkastellaan tietokoneelle asennetulla Dran-View 7 -ohjelmistolla.

4. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään osia maanosakohtaisten konttiterminaalien keskijänniteverkon pääkaavioista, joihin epälineaarinen kuorma voidaan liittää. Lisäksi esitellään komponenttivalinnat, mitoituslaskelmat sekä releiden suojausasettelut epälineaarisen kuorman liittämiseksi verkkoon. Lopuksi arvioidaan mittaustuloksia yhden epälineaarisen kuorman aiheuttamista harmonisista yliaalloista, arvioidaan harmonisten yliaaltovirtojen summautumista ja esitellään ratkaisu niiden vaimentamiseksi.

4.1 Eurooppalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkko

Esimerkkinä käytettävän kuvassa 14 esitetyn Euroopassa sijaitsevan konttiterminaalin pääsähköasema koostuu kahdesta 30 MVA ja 33/11 kV Dyn11 -muuntajasta, jotka syöttävät erillisiä 2000 A ja 11 kV kaksoiskiskollisia Schneider WSB -kojeistoja. Kaksoiskiskojärjestelmän etuihin kuuluu muun muassa toisen kiskojärjestelmän tekeminen jännitteettömäksi käytön häiriintymättä [11]. Kojelistot on liitetty toisiinsa normaalisti auki-tilassa olevalla kaksoiskiskosillalla, joista toinen on kytketty pääkiskoon ja toinen varakiskoon. Kiskoissa A1 ja A2 on kummassakin 15 kappaletta 630 A katkaisijalähtöä, joilla syötetään erityyppisten satamanosturien sähköasemia sekä muita kuormia.



Kuva 14. Eurooppalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkon osan yksijohdinkaavio.

Tarkastellaan kuvan 14 11 kV sähköasemaa numero 1, jota syötetään kolmella vaiheella pääsähköasemalta 500 mm² yksijohtimisilla kaapeleilla. Keskijännitekojeistona käytetään kuvan 15 mukaista ilmaeristeistä Schneider GenieEvo -kojeistoa, joka on nimellisvirraltaan 630 A ja nimellisjännitteeltään 13,8 kV.



Kuva 15. Schneider GenieEvo -keskijännitekojeisto [13].

Sähköasemalla on myös toinen 11 kV syöttö, joka on kytketty toiseen samantyyppiseen 11 kV sähköasemaan samankokoisilla kaapeleilla. Syöttökaapeleita suojaa kummassakin syötössä oma 630 A Schneiderin VC6-tyyppinen katkaisija. Katkaisijan päätoiminen laukaisukäsky tulee Siemens 7SG18 Solkor N -differentiaalireleeltä, jonka virtatiedot mitataan kaapelin alku- ja loppupään virtamuuntajilla. Oikosulku- ja maasulkuvioissa sähköaseman pääkatkaisijaa ohjaa Schneider Sepam S40 -rele, joka toimii varasuojana differentiaalireleelle.

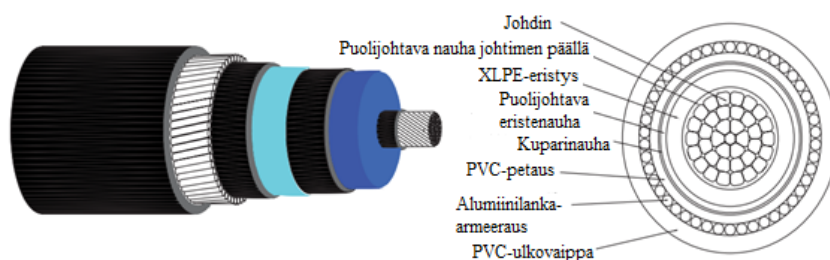
Kiskosto on jaettu kahteen osaan VB6-tyyppisellä pitkittäiserottimella, joka on normaalissa käyttötilanteessa auki-asennossa. Kun kummatkin syötöt ovat kytketty kiskostoon, ei kiskojen välinen erotin saa olla kiinni-asennossa. Kiskoerotin sisältää oman 630 A pitkittäiskatkaisijansa ja Sepam S40 -releensä oikosulku- ja maasulkusuojauksella. Sitä käyttäen voidaan muodostaa rengasverkko ja tarvittaessa syöttää toista sähköasemaa. Toiseen sähköasemaan kytketyn syötön katkaisijaa ohjaa Sepam S40- ja Solkor N -releet oikosulku-, maasulku-, ja differentiaalisuojauksineen. Kiskoerotin jakaa 8 ASC-nosturilähdön kahteen osaan, joista toiseen on määrä asentaa kaapelilähtö tulevalle tasasuuntaajakuormalle. Lyhenne ASC tulee sanoista Automatic Stacking Crane eli automaattinen konttinosturi. Maan puoleisia nostureita syöttävällä kiskolla on myös sähköaseman 400

V muuntajalähtö. Kiskoston, jolla on 2 erillistä syöttöä, jakaminen kahteen osaan pitkitäiserottimella ja -katkaisijalla parantaa sähkön syötön varmuutta vika- ja huoltotilanteissa, jolloin puolet kiskostosta voidaan erottaa sähkönsyötöstä kokonaan ja jatkaa sähkönsyöttöä toiselle osalle kiskostoa. Kojeiston kaikki 10 kappaletta 11 kV maakaapelilähtöä on suojattu 200 ampeerin VC2-tyyppisillä katkaisijoilla. VC2-, VB6-, että VC6-tyypin katkaisijoilla on kyky katkaista 25 kA vikavirta. Rakenteeltaan ne ovat tyhjökatkaisijoita. Tyhjökatkaisijan toiminta perustuu kiinteään ja liikkuvaan koskettimeen, jotka ovat sijoitettu tyhjösäiliöön [11]. Kun koskettimet erkanevat toisistaan, jää valokaari palamaan kosketinpinnoilta höyrystyneeseen metallipilveen. Virran nollakohdassa metallihöyryn ionisaatio katoaa ja itse höyry tiivistyy, jonka jälkeen valokaari sammuu ja katkaisu on tapahtunut.

Kun tarkastellaan kaapelilähtöä, johon tulevaisuudessa tullaan kytkemään edellä esitelty epälineaarinen kuorma, on hyvä aloittaa määrittämällä itse kuorman koko. Kaavalla 4 lasketaan tasasuuntaajakuorman ottama virta I sen ottaman näennäistehon S avulla, kun pääjännite U on 11 kV. Virran I arvoksi saadaan 33,7 A, kun näennäisteho S on 643 kVA. Eri kaapelivalmistajien virrankestoisuusarvoja tarkastellessa nähdään, että kuorman jokaiselle vaiheelle riittäisi 16 mm² yksijohtimiset syöttökaapelit, kun otetaan huomioon asennustapaan ja asennuspaikkaan liittyvät kertoimet. 16 mm² kaapelin oikosulkuvirran kestoisuus ei kuitenkaan ole riittävän suuri, sillä kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruus sähköasemalla on noin 11,4 kA ja yksivaiheisen maasulkuvirran suuruus on noin 1,6 kA.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (4)$$

Muut 11 kV sähköaseman keskijännitekojeistoon liittyvien lähtöjen kaapelit ovat tyyppiltään kuvan 16 mukaisia 50 mm² yksijohtimisia, XLPE-eristettyjä, suoraan maan alle asennettavia kuparikaapeleita, jotka sisältävät myös alumiinilangoilla toteutetun suoja-kuoren. Lyhenne XLPE tulee sanoista Cross-Linked Polyethylene. Kaapelin 1 sekunnin oikosulkuvirtakestoisuus on 7,15 kA, joka on riittävä releen toiminta-ajan ollessa huomattavasti nopeampi. Kaapelin nimellisjännite on 6.35/11 kV ja maahan kaivettuna sen nimellisvirta on 220 A, kun maan lämpötila on 15 °C. Asennussyvyys tulee olla vähintään 0,8 metriä. Kyseistä kaapelityyppiä valmistaa muun muassa Nexans ja Universal Cable.



Kuva 16. 11 kV -kaapelin rakenne [14].

Kaapelin jännitteenalenema U_{Δ} voidaan laskea kaavalla 5. Järjestelmän jännitteenalenema on hyvä minimoida, sillä se on tärkeä sähkön laatutekijä. Konttiterminaalialueella kaapelien pituudet sähköasemilta kuormille ovat yleensä alle yhden kilometrin. Järjestelmän pätövirta I_p on 32,2 A ja loisvirta I_q on 10,1 A. Kaapelin resistanssi R 90 °C lämpötilassa on 0,494 Ω /km ja reaktanssi X on kaapelit vierekkäin aseteltuna 0,185 Ω /km. Kaapeli, jonka pituus l on yksi kilometri, aiheuttaa jännitteenaleneman 18 V.

$$U_{\Delta} = l \cdot (I_p \cdot R + I_q \cdot X) \quad (5)$$

Sähköaseman keskijännitekojeistoon liityttäessä kaapelipäätteenä käytetään sisäkäyttöön tarkoitettua Raychem IXSU-F3121 -tyyppistä päätettä sekä BLMT-25/95-17 -tyyppistä kaapelikenkäinnitystä M16-kokoisella pultilla. Kaapelikengän materiaali on alumiinia. Pääte soveltuu käytettäväksi 12 kV, 50 mm² ja yksijohtimisen kaapelityypin kanssa. Kaapelipäätteen tehtäviä ovat yhdistää eristetyt johtimet keskijännitekojeiston liittimiin, pitää kosteus poissa kaapelista sekä suojata kaapelin päätä mekaanisesti [11]. Avoimet kaapelipäätteet tulee suojata Raychem RCAB4120 -suojatupilla, jotka toimivat eristeenä suojaten kaapelia läpilyönneiltä sekä ulkoisilta vaikutuksilta, kuten kosteudelta.

Kaapelin kuparinauhasuojus maadoitetaan Raychem EAKT-1656 -kitillä. Kaapelin alumiinilankasuojakuoren maadoitukseen käytetään EAKT 1637 -kittiä. Näillä maadoituksilla estetään vikavirtojen kulkeutuminen kaapelin suojarakenteissa maasulkutilanteissa ja kaapelin eristeiden hajoaminen jännitepotentiaalın muodostuessa johtaviin suojarakenteisiin. Kun kaapelin johtavat suojarakenteet maadoitetaan, muodostuu vikavirralla paluureitti, joka mahdollistaa suojalaitteiden nopean toiminnan.

Sähköaseman 11 kV lähtö suojataan digitaalisella Schneider Sepam S40 -suojareleellä. Virtamuuntajina käytetään jokaisella vaiheella Schneiderin valmistamaa yksikköä, jonka muuntosuhde vaiheilla on 100/1. Tarkkuusluokaltaan virtamuuntajat ovat 5P20. Tarkkuusluokan tunnus tarkoittaa, että kyseisen virtamuuntajan virhe on alle 5 %, kun virta on 20-kertainen virtamuuntajan nimellisvirtaan nähden. Kirjain P tarkoittaa, että virtamuuntaja on tarkoitettu käytettäväksi suojaukseen (eng. protection) [11]. Nimellistaakka käytettävällä virtamuuntajalla on 2,5 VA. Suojaustoimintona käytetään ANSI 50/51-koodin mukaista suojausta, joka mittaa vaiheen ylivirran suurinta arvoa ja avaa katkaisijan suojaten näin vaiheiden välisiltä oikosuluilta.

Sepam S40 -releen ylivirtasuojaus asetellaan siten, että rele toimii IDMT-moodissa pienillä ylivirran arvoilla ja DT-moodissa suurella ylivirralla. Lyhenne IDMT tulee sanoista Inverse Definite Minimum Time, joka kuvaa yleisesti releen toiminta-ajan suhdetta käänteisesti vikavirran suuruuteen. Lyhenne DT tulee sanoista Definite Time, joka kuvaa releen toimintaa vakioaikaisena, kun virta ylittää tietyn asetteluarvon.

Rele avaa lähtöä suojaavan 200 A katkaisijan IEC 60255 -standardissa määritellyn SIT-toiminta-aikakäyrän mukaisesti, kun releen mittaama virta ylittää 1,2 kertaisesti kuorman

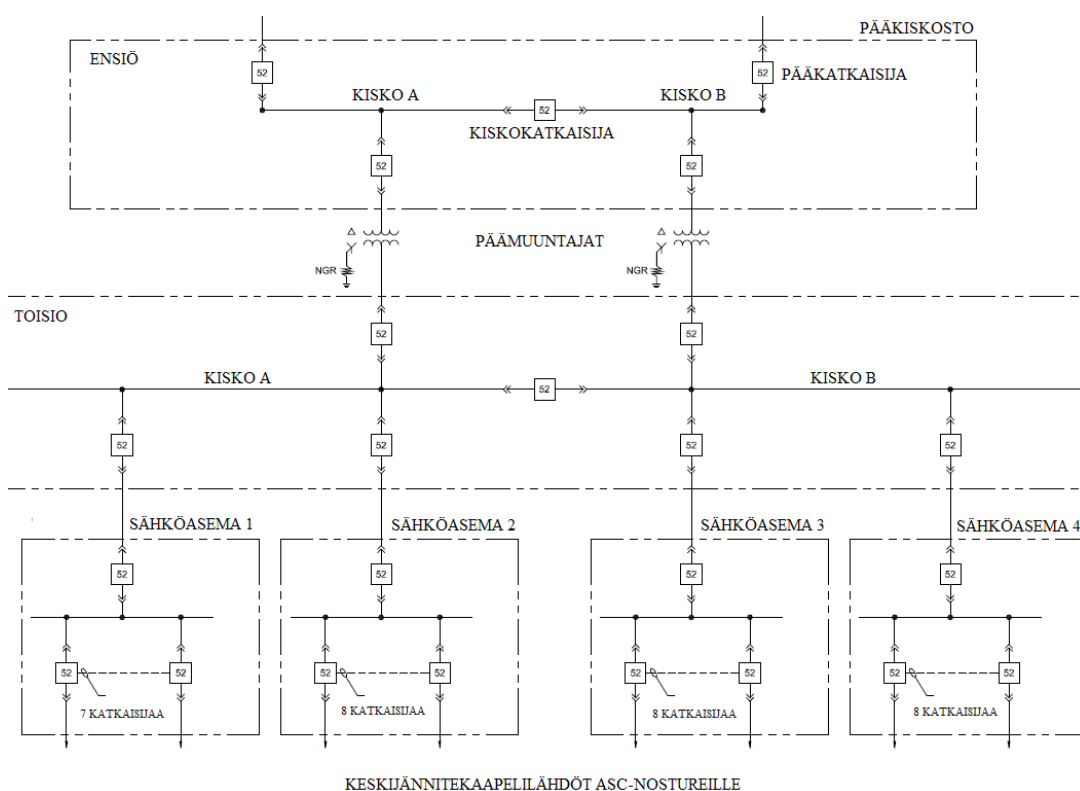
ottaman noin 34 A maksimivirran. Lyhenne SIT tulee sanoista Standard Inverse Time, joka kuvaa releen toiminta-ajan nopeutumista vikavirran kasvaessa määrätyn kaavan mukaisesti. Toimintaperiaate on tällöin siis käänteisaikainen. Releen toiminta-aika T_d on noin 0,12 s ja se voidaan laskea kaavalla 6. Alstom Gridin teoksesta [15] saadaan selitykset kaavan eri tekijöille. Kaavassa I_k on vikavirta 11415 A, I_s on releen mittaaman virran asetteluarvo 40 A ja T on releen toiminta-aika I_s :n ollessa 10-kertaisessa arvossaan eli tässä tapauksessa 0,297 s. Vakiot $\alpha=0,02$, $\beta=2,97$ ja $K=0,14$ määrittävät käytettävän IDMT-käyrän mukaisen toiminta-ajan. Kaavan tekijöiden T ja β osamäärä muodostaa releen asetuksen nimeltä Time Multiplier Setting (TMS), jolla releen toimintanopeutta voidaan säätää. Tässä esimerkissä se asetetaan arvoon 0,1.

$$T_d = \frac{K}{\left(\frac{I_k}{I_s}\right)^\alpha - 1} \cdot \frac{T}{\beta} \quad (6)$$

Kun oikosulkuvirta kasvaa arvoon 330 A ja sen yli, releen toiminta-aikakäyrä poistuu käytöstä ja releen toiminta muuttuu vakioaikaiseen DT-moodiin, missä releen laukaisuun tarvitaan asetteluarvon 330 A ylittävä vikavirran arvo, joka kestää yhtäjaksoisesti 0,05 sekuntia. Toisena suojaustoimintona käytetään ANSI 50N/51N-suojausta, joka havaitsee maasulkuviat mittaamalla tai laskemalla jäännösvirtaa kolmivaiheisten virtasensorien avulla. Releen toiminta-aikakäyrinä käytetään samoja kuin edellä esitellyssä oikosulkusuojauksessa. Maasulkuvian katkaisuaika on SIT-käyrän mukaisesti 0,1 sekuntia, kun maasulkuvirta on 20 A. Virran ylittäessä arvon 100 A rele toimii DT-moodissa, jossa sen toiminta-aika on vakio 0,05 sekuntia. Edellä esitelty releen toiminta-ajat varmistavat suojauksen selektiivisyyden, mikä estää muiden releiden laukeamisen ja näin pienentää sähkökatkoista aiheutuvia haittavaikutuksia konttiterminaalialueella.

4.2 Pohjois-amerikkalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkko

Pohjois-amerikkalaisena esimerkkinä käytettävän kuvassa 17 esitetyn konttiterminaalin pääsähköasema koostuu kahdesta 10/15 MVA ja 34,5/12,47 kV Dyn -muuntajasta, jotka syöttävät muuntajan toisiopuolen pääkiskoston kiskoja A ja B. Toisiopuolen keskijännitekojeisto on tyypiltään yksikiskojärjestelmäinen sisäkäyttöön tarkoitettu Schneider Square D Masterclad Series 5 1200 A ja 15 kV -kojeisto. Kiskot A ja B on liitetty toisiinsa normaalisti auki-tilassa olevalla ulosvedettävällä 600 ampeerilla laukeamaan asetetulla Schneider Square D Type VR-15050-12 -tyhjökatkaisijalla, jota ohjaa Schneider Sepam S42 -rele. Kiskoissa A ja B on kummassakin 3 kappaletta 400 A katkaisijalähtöä, joilla syötetään ASC-satamanosturien sähköasemia sekä muita kuormia.



Kuva 17. Pohjois-Amerikkalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkon osan yksijohdinkaavio.

Tarkastellaan kuvan 17 12,47 kV sähköasemaa numero 1, jota syötetään kolmella vaiheella pääsähköasemalta 500 kcmil (250 mm²) yksijohtimisilla kaapeleilla sekä yhdellä yksijohtimisella 1 AWG (40 mm²) maadoituskaapelilla. Keskijännitekojeistona käytetään kuvan 18 mukaista samaa mallia kuin päämuuntajan toisiopuolella. Syöttökaapelia suojaa 400 ampeerilla laukeamaan asetettu Schneiderin valmistama katkaisija, joka on samaa tyyppiä kuin päämuuntajan toisiopuolella. Katkaisijan laukaisukäsky oikosulku- ja maa-sulkuvioissa tulee Schneider Sepam S42 -releeltä.



Kuva 18. Schneider Masterclad -keskijännitekojeisto [16].

Päämuuntajan ensiö- ja toisiopuolen kiskostojen varasyöttömahdollisuuksien lisäksi kuvan 17 ulkopuolelle jääneiden sähköasemien lähdöt muodostavat rengasverkon, jolla tarvittaessa voidaan syöttää toista sähköasemaa, kun kisko A tai B on pois käytöstä. Toiseen sähköasemaan kytketyn syötön katkaisijaa ohjaa Sepam S42 -rele oikosulku- ja maasulkusuojauksineen. Sähköaseman kahdeksaa lähtöä suojaa sama katkaisijatyypin kuin sähköaseman syötössä, mutta lähtöjen katkaisijat on asetettu laukeamaan 100 A virralla. Käytettävän katkaisijatyypin virrankatkaisukyky on 25 kA.

Tarkasteltavan kaapelilähdön kuorman ottama virran I arvoksi saadaan 29,7 A kaavalla 4, kun kuorman ottama näennäisteho S on 643 kVA ja pääjännite U on 12,47 kV. Kolmivaiheinen liityntä sähköaseman keskijännitekojeistoon tehdään kuvan 19 mukaisilla Uniblend PVC High Speed 2 AWG (35 mm²) yksijohtimisilla, EPR-eristetyillä, neljän tuuman lasikuituputkeen asennettavilla kuparikaapeleilla. Lyhenne EPR tulee sanoista Ethylene Propylene Rubber. Kaapelin 1 sekunnin oikosulkuvirtakestoisuus on 4,5 kA, joka on riittävä, kun virran katkaisu tehdään riittävän nopeasti kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruuden ollessa sähköasemalla 6090 A. Kaapelin nimellisjännite on 15 kV ja maahan kaivettuun putkeen asennettuna kahden muun kaapelin kanssa sen nimellisvirta on 155 A, kun johtimen lämpötila on 90 °C. Putken asennussyvyys on 107 cm putken yläosasta maan pintaan. Kyseisen kaapelin valmistaa General Cable ja sen kataloginumero on 17031.130205.



Kuva 19. General Cable Uniblend PVC High Speed -kaapeli [17].

Kaapelin jännitteenalenema U_{Δ} lasketaan kaavalla 5. Järjestelmän pätövirta I_p on 28,4 A ja loisvirta I_q on 8,9 A. Kaapelin resistanssi R 90 °C lämpötilassa on 0,668 Ω /km ja reaktanssi X on kaapelit vierekkäin aseteltuna 0,254 Ω /km. Kaapeli, jonka pituus l on yksi kilometri, aiheuttaa jännitteenaleneman 21 V.

Sähköaseman keskijännitekojeistoon liityttäessä kaapelipäätteenä käytetään sisäkäyttöön tarkoitettua Raychem HVT-Z-151-G -tyyppistä päätettä sekä Two-Hole Nema -tyyppistä puristettavaa kaapelikenkäkiinnitystä kahdella 1/2 tuuman (M12) kokoisella pultilla. Kaapelikengän materiaali on kupari ja sen kataloginumero on 1099939-3. Pääte soveltuu käytettäväksi 15 kV, 2 AWG ja yksijohtimisen kaapelityypin kanssa. Kaapelin kuparinauhasuojus maadoitetaan Raychem HV-BRAID-4-1520 -kuparipunoksella. Kuparipunos kiinnitetään kaapelin kupariteippisuojukseen HVS-GC-0.5 -puristimella.

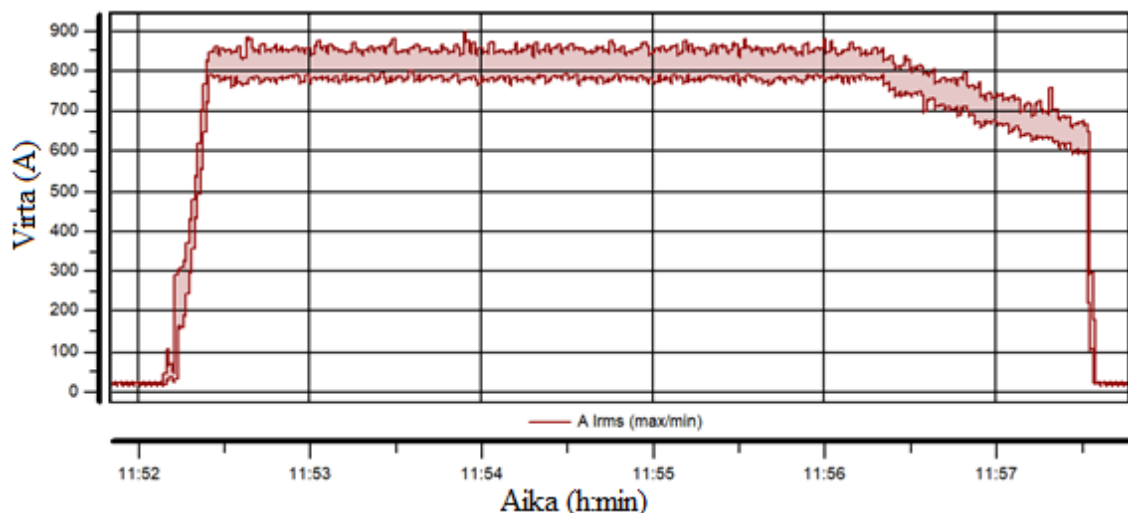
Yhdysvalloissa käytetään keskijänniteverkossa nelijohdinjärjestelmää, joten tässä tapauksessa nollajohtimena käytetään yhtä yksiytimistä DuraSheath High Speed 6 AWG (16 mm²) kokoista 600 V kaapelia. Kaapeli on EPR-eristetty ja sen valmistaa General Cable. Kaapelin kataloginumero on 14511.410605. Kaapeli kiinnitetään keskijännitekojeistoon puristettavalla kaapelikenkäkiinnityksellä, jonka pulttikoko on 1/4 tuumaa (M6). Kaapelikengän materiaali on kupari ja sen kataloginumero on 1099899-1.

Sähköaseman 12,47 kV lähtö suojataan digitaalisella Schneider Sepam S42 -suojareleellä. Virtamuuntajina käytetään jokaisella vaiheella Schneiderin valmistamaa yksikköä, jonka muuntosuhde vaiheilla on 600/5. Nollajohtimen virtamuuntajan nimellinen muuntosuhde on 50/5, mutta sen asetteluarvona käytetään 25/5. Ylivirtasuojaukseen käytetään ANSI 50/51-koodin mukaista ylivirtasuojaukseen käytetään 51N-koodin mukaista suojaukseen. Maasulkusuojaukseen käytetään 51N-koodin mukaista suojaukseen. Konttiterminaalien sähkösuunnitelmissa ei mainita releiden suojausasetteluja, joten niistä tehdään oletus. Pohjois-Amerikan konttiterminaaliesimerkin suojausasetteluihin voidaan ottaa mallia luvussa 4.1 käsitellystä eurooppalaisesta esimerkistä, sillä reletyyppi on käytettäviltä suojausmenetelmiltään samanlainen.

Sepam S42 -releen ylivirtasuojaukseen käytetään siis SIT-toiminta-aikakäyräistä IDMT-moodia silloin, kun releen mittaama virta ylittää noin 40 A. Releen TMS asetetaan arvoon 0,1, jolloin releen toiminta-aika T_d on 0,13 sekuntia 40 ampeerin virralla. Yli 300 A virroilla releen toimintakäyrä poistetaan käytöstä ja rele asetellaan toimimaan 0,05 sekunnissa DT-moodissa. Maasulkuvioissa käytetään ainoastaan SIT-toiminta-aikakäyräistä IDMT-moodia, joka voidaan asettaa laukeamaan 20 A virralla 0,1 sekunnissa.

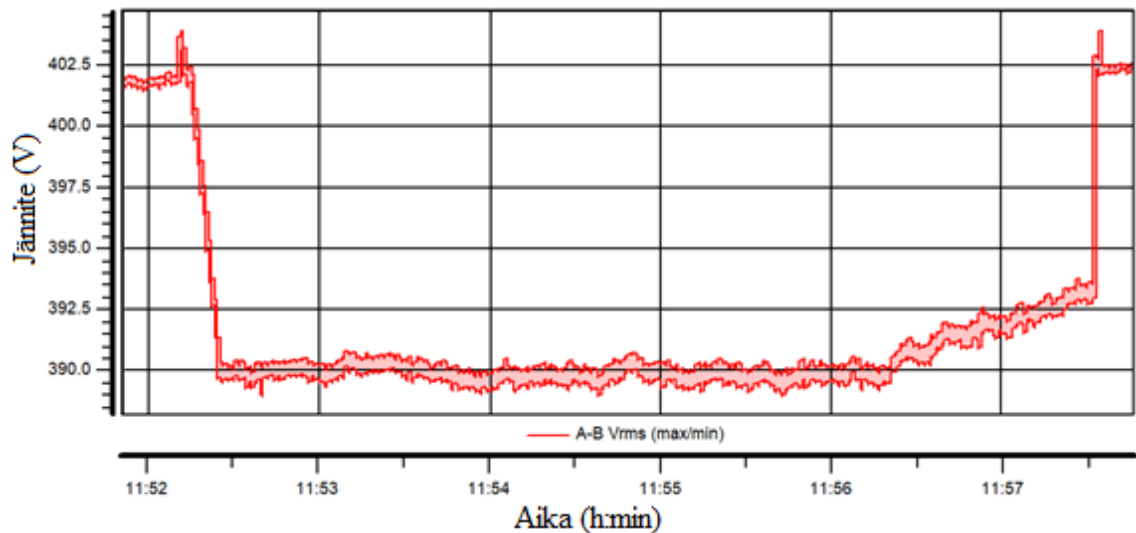
4.3 Mittaustulokset

Mittaustuloksissa tarkastellaan harmonisia yliaaltoja prosessin aikana, jolloin epälineaarinen kuorma on kytkettynä verkkoon. Prosessia ja sen kestoä auttaa ymmärtämään paremmin kuvan 20 syöttävän verkon vaiheen A virtakuvaaja, jolloin järjestelmää käytetään täydellä teholla. Vaihevirrat nousevat täydellä teholla yli 800 ampeeriin yhden vaiheen pätötehon ollessa noin 175 kW. Loistehon arvo on tällöin noin 13 kVAR. Prosessin tullessa päätökseen virransyöttö katkaistaan hieman yli 5 minuutin jälkeen, jota ennen virran arvo laskee hitaasti noin yhden minuutin.



Kuva 20. Syöttävän verkon vaiheen A virran kuvaaja prosessin aikana.

800 A vaihevirrat aiheuttavat vaiheiden välisissä pääjännitteissä jännitteenalenemaa, joka esitetään kuvassa 21 syöttävän verkon vaiheiden A-B väliselle pääjännitteelle. Jännitteenalenema on prosessin aikana suurimmillaan noin 11 V, joka on alle 3 % nimellisjännitteestä. Myös muiden vaiheiden välisten pääjännitteiden jännitteenalenemat ovat samansuuruisia.

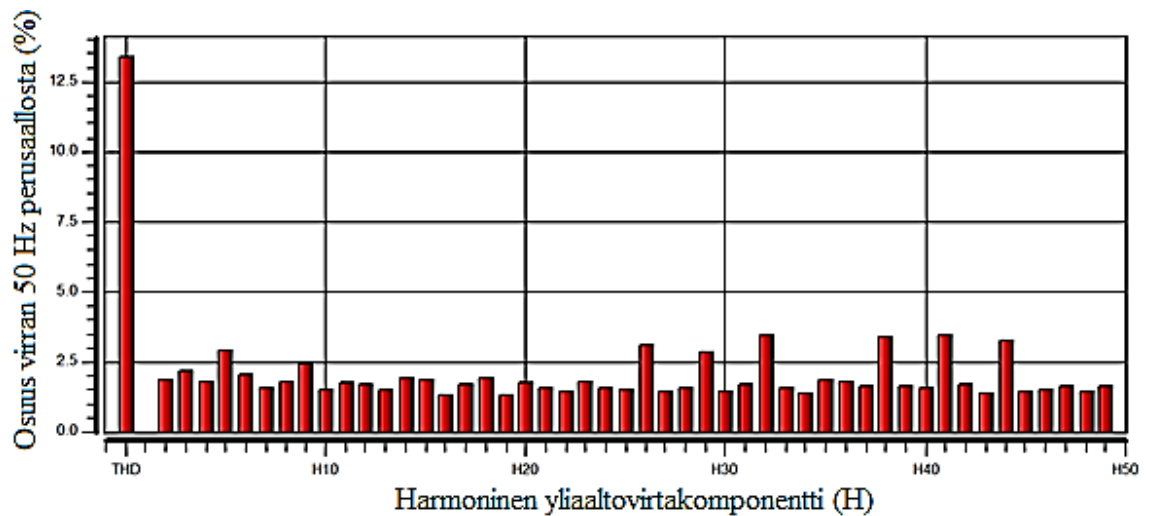


Kuva 21. Syöttävän verkon vaiheiden A-B välisen pääjännitteen kuvaaja prosessin aikana.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan harmonisten yliaaltojen mittaustuloksia ensin jatkuvassa tilassa, jossa epälineaarista kuormaa käytetään täydellä sekä puolella teholla. Tämän jälkeen tarkastellaan prosessin muutostilaa, jossa järjestelmä alkaa laskea virran arvoa suojellakseen komponentteja liialta lämpenemiseltä. Mittaustuloksia tarkastellaan pääosin syöttävän verkon vaiheessa A, sillä vaiheiden B ja C tulokset ovat hyvin samankaltaisia vaiheeseen A verrattuna.

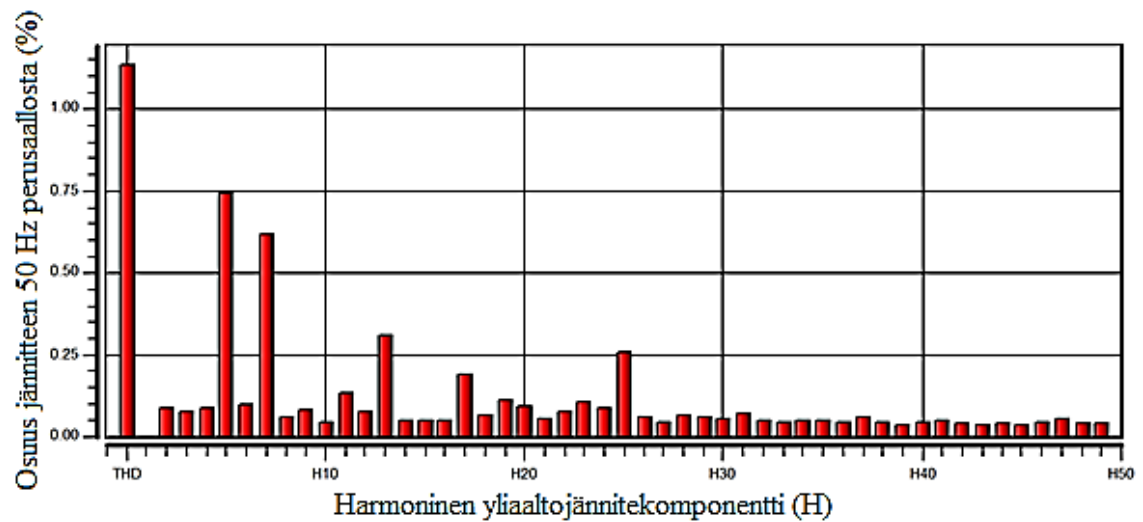
4.3.1 Jatkuvan tilan harmoniset yliaallot

Jatkuvassa tilassa, jossa epälineaarista kuormaa käytetään täydellä teholla, syöttävän verkon vaiheen A virran harmoniset yliaallot jakautuvat kuvan 22 mukaisesti. Virran 50 Hz perusaallon suuruus on mittaushetkellä 776 A THD-arvon ollessa 13,4 %, jolloin verkosta otetun vaiheen A virran suuruus on 880 A. 50 Hz perusaallolle voidaan käyttää nimitystä H1, jossa H kuvastaa virran tai jännitteen harmonista yliaaltokomponenttia ja numero 1 kerrointa 50 Hz taajuudelle. Muita harmonisia yliaaltokomponentteja voidaan kuvata vaihtamalla kerroinnumero vastaamaan harmonisen yliaallon taajuutta. Mittaustuloksista voidaan erottaa pienten parittomien virtayliaaltojen, kuten H3, H5 ja H9 olevan hieman suurempia muiden ollessa noin 1,5 %. Suuremmilla taajuuskerrannaisilla jakauma on melko tasainen poikkeuksena virtayliaallot H26, H29, H32, H38, H41 ja H44, jotka ovat kaikki yli 3 % perusaallosta.



Kuva 22. Syöttävän verkon vaiheen A virran harmoniset yliaaltokerrannaiset täydellä teholla.

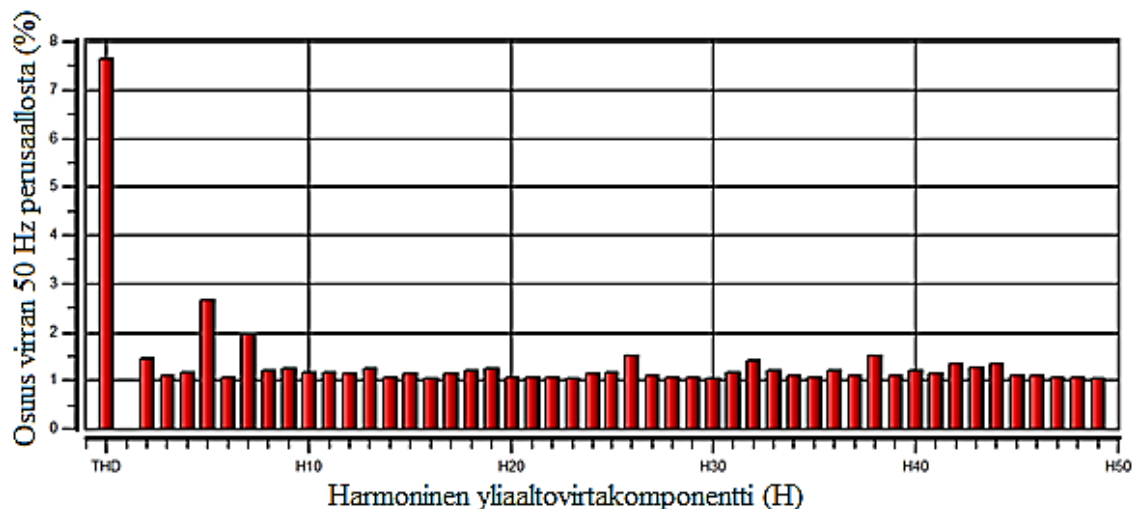
Syöttävän verkon vaiheiden A-B välisen pääjännitteen harmoniset yliaallot jakautuvat kuvan 23 mukaisesti. Pääjännitteen arvo mittaushetkellä on noin 390 V. Merkittävästi suurimmat jänniteyliaallot ovat H5 ja H7, jotka muodostavat suurimman osan 1,15 % suuruisesta THD-arvosta. Muita merkittäviä taajuuskerrannaisia ovat H13, H17 ja H25, jotka ovat 0,2-0,3 % perusaallosta. Muut yliaallot ovat pääosin alle 0,1 %.



Kuva 23. Syöttävän verkon vaiheiden A-B pääjännitteen harmoniset yliaaltokerrannaiset täydellä teholla.

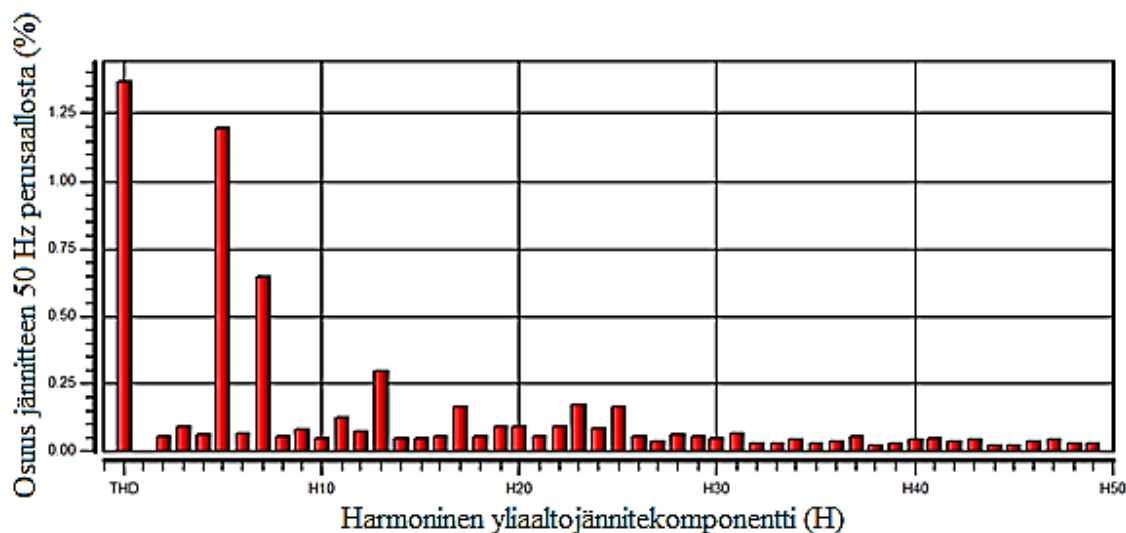
Epälineaarista kuormaa voidaan käyttää myös puolella teholla, mikä tarkoittaa ajallisesti pidempää prosessin kestoa. Syöttävän verkon vaiheen A virran harmoniset komponentit jakautuvat kuvan 24 mukaisesti syötettäessä kuormaa puolella teholla. Virran 50 Hz perusaallon H1 suuruus on mittaushetkellä 390 A THD-arvon ollessa 7,7 %, jolloin verkosta otetun vaiheen A virran suuruus on 420 A. Yksittäisistä harmonisista virtakomponenteista

dominoivimpia ovat H5 ja H7, jotka jäävät kuitenkin alle 3 prosenttiin. Muut virtakomponentit ovat hieman yli 1 %.



Kuva 24. Syöttävän verkon vaiheen A virran harmoniset yliaaltokerrannaiset puolella teholla.

Syöttävän verkon vaiheiden A-B välisen pääjännitteen harmoniset yliaallot jakautuvat kuvan 25 mukaisesti. Mittauksen tuloksena saatu THD-arvo on 1,37 %, joka on hieman suurempi kuin täyden tehon mittauksessa. Harmoninen jännitekomponentti H5 on lähes THD-arvon suuruinen, kun se täyden tehon mittauksessa oli 0,75 %. Merkittävistä jännitekomponenteista H7 ja H13 pysyivät kuitenkin samassa arvossa kuin täydellä teholla.



Kuva 25. Syöttävän verkon vaiheiden A-B pääjännitteen harmoniset yliaaltokerrannaiset puolella teholla.

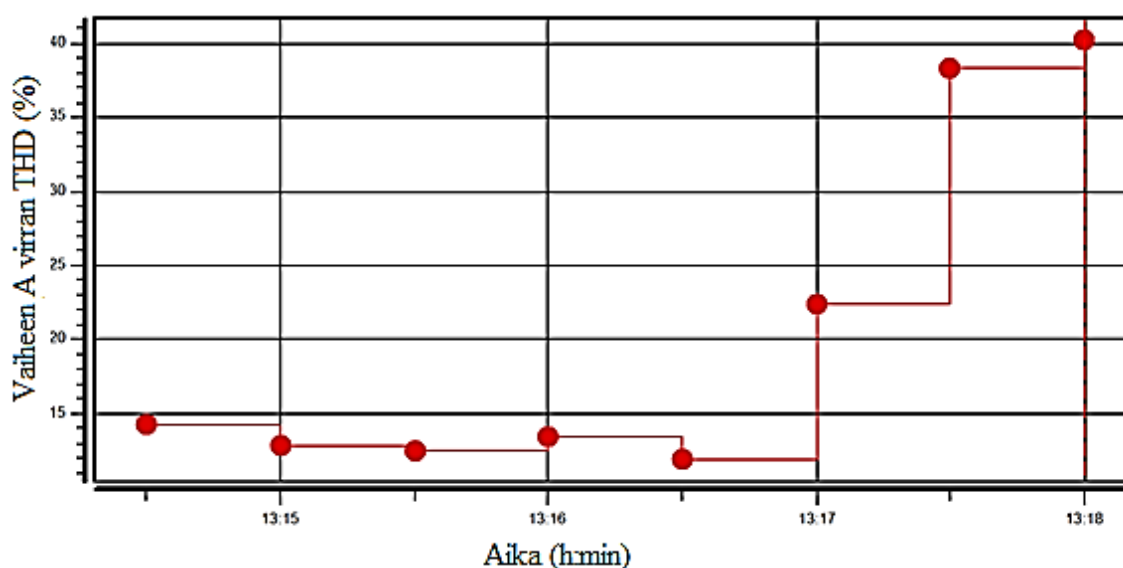
Mittaustulosten yhteenvedona voidaan todeta täyden tehon harmonisten yliaaltovirtojen THD-arvon olevan melko suuri. Virtayliaalloille alle 10 prosentin THD-arvoa voidaan pitää normaalina, joka ei aiheuta vaurioita komponenteille. Mitattu 13,4 % THD kasvattaa

riskiä komponenttien lämpenemiselle sekä pakottaa ottamaan perusaaltoon nähden kasvaneen virran huomioon muun muassa syöttävän verkon kaapelien ja muuntajan mitoituksessa. Harmoniset komponentit kasvattavat virran arvoa noin 100 ampeerilla, mistä aiheutuu merkittäviä tehohäviöitä niiden riippuessa virran neliöstä. Harmonisten yliaaltojännitteiden THD-arvo on alle 5 %, joka ei aiheuta komponenttien vikaantumista.

Käytettäessä kuormaa puolella teholla harmonisten yliaaltojen THD-arvot eivät yllä verkon komponenteille haitalliselle alueelle virran ja jännitteen osalta. Harmoniset virrat lisäävät järjestelmän kuormitusta noin 30 ampeerilla, mikä aiheuttaa hieman pienimuotoisempia tehohäviöitä sekä jo edellä mainittuja ongelmia.

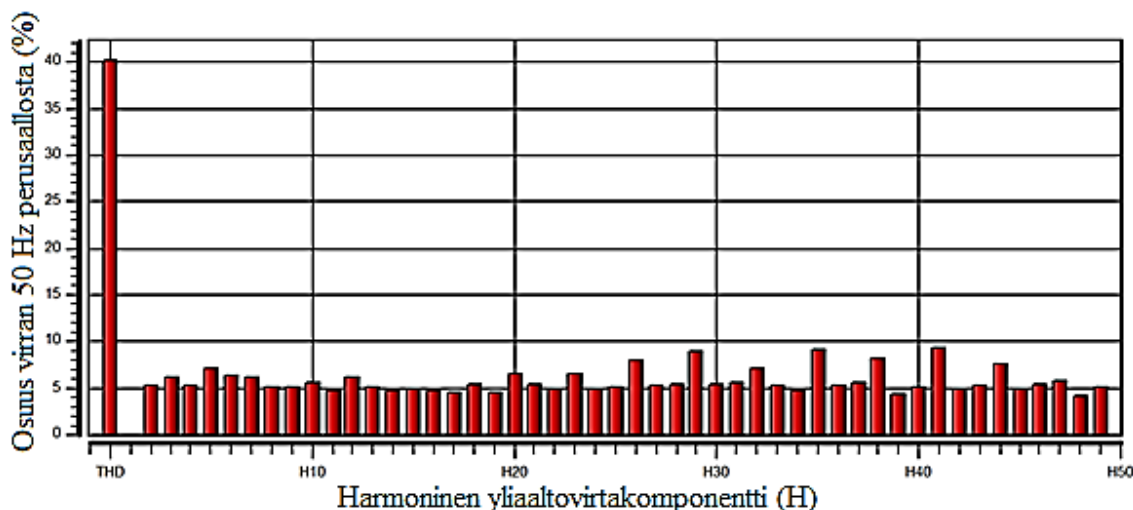
4.3.2 Muutostilan harmoniset yliaallot

Muutostilassa epälineaarista kuormaa käytetään ensin täydellä teholla, jonka jälkeen järjestelmä alkaa rajoittamaan kuormavirtaa suojellakseen komponentteja liian korkeilta lämpötiloilta. Syöttävän verkon vaiheen A virran THD-arvo muuttuu kuvan 26 mukaisesti jatkuvan tilan alle 15 prosentista muutostilan huippuun noin 40 prosenttiin, jolloin virran 50 Hz perusaallon H1 suuruus on 243 A. Verkosta otettu vaiheen A kokonaisvirta on tällöin 340 A. Vaiheessa B THD-arvo nousee noin 37 prosenttiin ja vaiheessa C noin 19 prosenttiin.



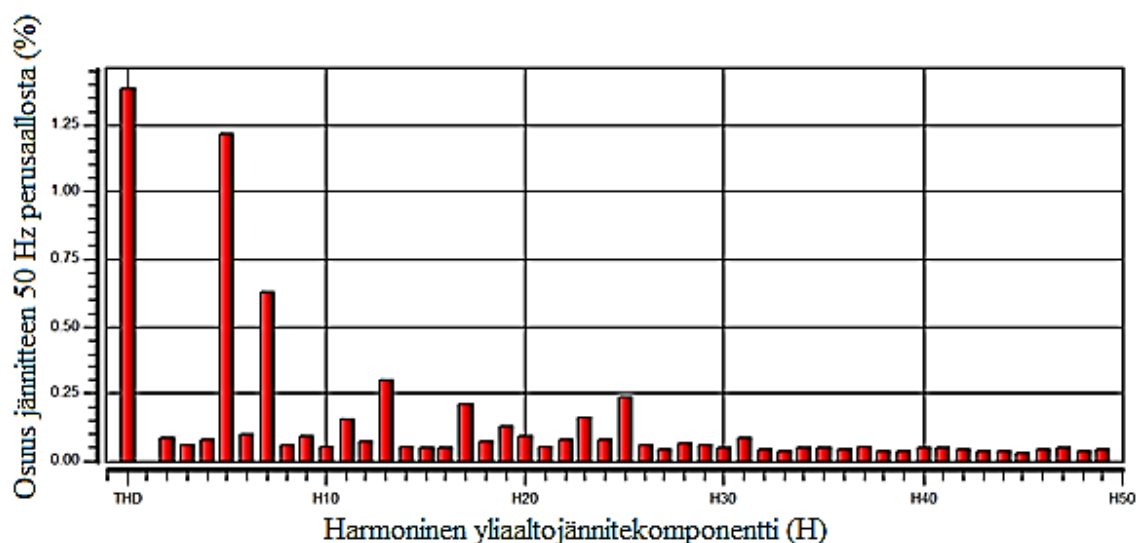
Kuva 26. Syöttävän verkon vaiheen A virran THD-arvon muutos järjestelmän siirtyessä virranrajoitustilaan.

Syöttävän verkon vaiheen A virran harmoninen spektri THD-arvon ollessa suurimmillaan jakautuu kuvan 27 mukaisesti. Mittaustuloksista nähdään, että lähes kaikki harmoniset yliaaltokomponentit ovat yli 5 % perusaallosta. Harmoniset virtakomponentit H26, H29, H35, H38, H41 ja H44 ovat kaikki lähellä 10 % arvoa perusaallosta.



Kuva 27. Syöttävän verkon vaiheen A virran harmoninen spektri THD-arvon ollessa suurimmillaan virranrajoitustilassa.

Syöttävän verkon vaiheiden A-B välisen pääjännitteen harmoniset yliaallot jakautuvat muutostilanteen lopussa kuvan 28 mukaisesti. Pääjännitteen THD-arvo vaihtelee kuvan 28 virran mukaisesti vaihteluvälillä 1,1-1,4 %. Merkittävästi suurimmat jänniteyliaallot ovat H5 ja H7. Muita merkittäviä taajuuskerrannaisia ovat H13, H17 ja H25 aivan kuten jatkuvan tilan mittauksessa.



Kuva 28. Syöttävän verkon vaiheiden A-B pääjännitteen harmoninen spektri THD-arvon ollessa suurimmillaan virranrajoitustilassa.

Mittaustulosten yhteenvedona voidaan todeta harmonisten yliaaltovirtojen 40 % THD-arvon olevan erittäin suuri järjestelmän ollessa virranrajoitustilassa. Harmonisten yliaaltojännitteiden THD-arvo nousi noin 0,3 % verrattuna jatkuvan tilaan arvoon, mutta on silti sallitun raja-arvon alapuolella.

4.4 Harmonisten yliaaltojen kumoutuminen

Tulevaisuudessa on todennäköistä, että konttiterminaalia syöttävään sähköverkkoon kytketään useampia epälineaarisia kuormia, joita saatetaan käyttää samanaikaisesti noin 10 minuutin sykleissä useita kertoja päivän aikana. Taulukossa 1 esitettyjä IEEE 519-2014 -standardin raja-arvoja tulisi soveltaa koko konttiterminaalia syöttävän sähköaseman kiskostoon, josta syötetään myös muita asiakkaita. Kyseisten sähköasemien tietoja ei tätä työtä varten ole mahdollista saada, joten Euroopan sekä Pohjois-Amerikan konttiterminaalien osalta tarkastellaan konttiterminaalin päämuuntajan ensiöpuolen kiskostoa, jonka vikavirta-arvo tiedetään.

Tarkastellaan esimerkkinä Pohjois-Amerikkaa, jonka päämuuntajan ensiöpuolen ilmoitettu vikavirta on 11 kA. Pohjois-Amerikan konttiterminaalin laskennallinen maksimikuormavirta 12,47 kilovoltin tasossa kahdella 10 MVA päämuuntajalla on 926 A. Taulukon 1 tarkasteltava rivi harmonisten yliaaltovirtojen raja-arvoille valitaan oikosulkuvirran ja kuormavirran suhdeluvun perusteella, mikä Pohjois-Amerikan tapauksessa on alle 20-kertainen, mikäli muuntajien kuormitus on nimellinen. Syötettäessä 10 yksikköä täydellä teholla virran THD-arvon ollessa 13 % (40 A), saadaan liittymän maksimivirtaan 926 A suhteutettuna harmonisten yliaaltovirtojen osuudeksi 4,3 %, mikä on alle standardissa määrätyn 5 % raja-arvon. Harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumista ei tässä laskussa otettu huomioon, mikä johtaa yliaaltoihin liittyvien ongelmien yliarvioimiseen.

Harmonisten yliaaltojen kumoutumiseen liittyen käsitellään esimerkkiä, jossa konttiterminaalin sähköverkkoon kytketään 10 yksikköä epälineaarisia kuormia. Oletetaan vastoin kappaleessa 2.2 esitettyä sähköautojen lataukseen liittyvää teoriaa, että kaikkia yksikköjä syötetään samanaikaisesti. Esimerkin tapauksessa harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumista tulee todennäköisesti tapahtumaan ainoastaan, mikäli epälineaaristen kuormien syöttöprosessit ovat eri vaiheisia siten, että prosessi ei toimi kaikissa yksiköissä jatkuvassa tilassa täydellä teholla samanaikaisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa kuvassa 20 esiintyvää noin minuutin aikaikkunaa, jolloin kuorman ottama virta laskee prosessin loppua kohden. Tällöin kolmannen virtayliaallon kumoutumiskerroin K_{can} voisi ehkä saavuttaa arvon 0,3, jolloin kolmannen yliaallon arvo perusaallosta laskisi noin 1,4 prosenttiin. Mikäli viidennen yliaallon K_{can} ylttäisi arvoon 0,5, laskisi se noin 1,5 prosenttiin perusaallosta.

Järjestysnumeroltaan korkeilla harmonisilla K_{can} saattaa saavuttaa vielä suurempia arvoja. Kumoutumista voi tapahtua myös, mikäli jotakin yksikköä käytetään puolella teholla ja muita täydellä teholla. Täyden tehon mittauksessa kuorman aiheuttamat virtayliaallot ovat hyvin tasaisia mitattuun yliaaltokomponenttiin H50 asti, joten kumoutumista tulisi tapahtua suurella osalla harmonisista yliaalloista, jotta THD-arvo pienenesi merkittävästi.

4.5 Harmonisten yliaaltojen vaimentaminen

Harmonisia yliaaltovirtoja voidaan vähentää monin eri tavoin, mutta on syytä löytää kustannustehokas ratkaisu, jolla voidaan välttää mahdollinen verkon komponenttien hajoaminen, ylimääräinen lämpenemä sekä pienentää yliaaltojen aiheuttamia häviöitä. Järjestelmään on jo asennettu LCL-suodin, mikä vaikuttaa riittämättömältä. Mittaustuloksista ilmenneen harmonisten virtakomponenttien tasainen jakautuminen 50 Hz perusaallon ja H50 yliaallon välille osoittaa, että yliaaltovirtojen vaimennus vaatisi ratkaisun, joka toimii laajalla taajuusalueella. Aktiivisen yliaaltosuotimen asentaminen järjestelmään olisi monimutkainen sekä kallis ratkaisu, jonka käyttöönotto tulee tehdä huolellisesti parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi. Itsevirittyviä tuotteita on toki myös saatavilla.

Yksinkertainen tapa vaimentaa tasasuuntaajan aiheuttamia harmonisia yliaaltoja on lisätä induktiivista reaktanssia järjestelmää syöttävään verkkoon [18]. Tämä voidaan tehdä käyttämällä samantyyppistä muuntajaa, jota käytettiin syöttämään järjestelmää sen ollessa vielä prototyyppiasteella. Muuntajan näennäisteho on sama kuin tässä työssä käytetyn muuntajan, mutta sen fyysinen koko on suurempi. Aiemmin järjestelmän prototyyppille tehdyssä täyden tehon mittauksessa virran THD-arvo oli noin 2,3 % ja jännitteen THD-arvo noin 0,7 %, mitkä ovat huomattavasti alempia arvoja verrattuna tässä työssä mitattuihin arvoihin.

5. YHTEENVETO

Mittauksissa saavutettu epälineaarisen kuorman aiheuttama 13,4 prosentin virran THD-arvo on melko korkea, mikä voi tulevaisuudessa aiheuttaa ongelmia muun muassa järjestelmän komponenttien elinikää ajatellen. Yksittäisen epälineaarisen kuorman harmonisten yliaaltojen mittaustulosten yhteensovittaminen IEEE 519-2014 -standardissa esitettyjen harmonisten virta- ja jänniteyliaaltojen raja-arvojen kanssa on hankalaa, sillä raja-arvot annetaan sähköverkon pisteelle, josta syötetään myös muita asiakkaita. Tällöin harmonisten yliaaltojen mittaus tulisi tehdä kyseisessä pisteessä ja tarkastella yksittäistä konttiterminaalia siten yhtenä kokonaisuutena, mikä tämän työn puitteissa ei ole mahdollista. Tarkasteltujen konttiterminaalien muita yliaaltolähteitä ei myöskään tunneta, mikä vaikeuttaa omalta osaltaan koko konttiterminaalin sähköön laadun kokonaiskuvan muodostamista epälineaaristen kuormien lisäämisen jälkeen sekä edellä mainittuun standardiin vertaamista.

10 epälineaarisen kuorman vaikutusta sähköön laatuun voidaan kuitenkin yrittää arvioida summaamalla niiden tuottamat harmoniset yliaaltovirrat ja vertaamalla saatua arvoa koko konttiterminaalin nimellisvirtaan. Epälineaaristen kuormien aiheuttamien harmonisten yliaaltovirtojen osuus konttiterminaalin kokonaisvirrasta on näin sitä pienempi, mitä suurempi on koko konttiterminaalin kokonaisvirta. Laskelma 10 epälineaarisen kuorman aiheuttamasta virran THD-arvosta pohjois-amerikkalaisen konttiterminaalin sähköverkkoon on alle 5 %, mikä on alle standardissa annetun raja-arvon. Toisena esimerkkinä olleen eurooppalaisen konttiterminaalin nimellisvirta on suurempi, joten epälineaaristen kuormien aiheuttamien harmonisten yliaaltovirtojen osuus kokonaisvirrasta on pienempi.

Sähköverkkoon kytketyistä epälineaarista kuormista aiheutuvat harmoniset yliaaltovirrat summautuvat geometrisesti ollessaan erivaiheisia, jolloin virroissa tapahtuu kumoutumista. Harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumista arvioitiin muun muassa sähköautojen latausasemiin liittyvän tutkimuksen avulla, jonka perusteella voidaan antaa vain karkeita arvioita, sillä siinä esitetyt latausasemat ovat toisiinsa nähden erilaisia verrattuna tässä työssä käsiteltyihin identtisiin epälineaarisiin kuormiin. Merkittävää kumoutumista tapahtuu todennäköisesti vain, mikäli epälineaarisen kuorman noin 10 minuutin syöttöprosessi on eri vaiheessa verrattuna muihin kuormiin. Jokainen harmoninen virtayliaalto-komponentti kumoutuu yksilöllisesti ja verkkoon kytkettyjen kuormien lukumäärästä ja kuormien syöttöprosessien vaiheista riippuen harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumiskerroin voi teoriassa saavuttaa arvoja välillä 0-1, kun 1 tarkoittaa kokonaan kumoutunutta harmonista yliaaltovirtakomponenttia. Aiheeseen liittyvä mielenkiintoinen jatkotutkimuksen kohde olisi selvittää realistinen harmonisten yliaaltovirtojen kumoutumiskerroin, kun kymmentä epälineaarista kuormaa käytetään samanaikaisesti.

Mittaustulosten perusteella laajalla taajuusalueella esiintyviä harmonisia yliaaltovirtoja päätettiin tulevaisuudessa vaimentaa lisäämällä järjestelmää syöttävään verkkoon induktiivista reaktanssia. Tämä tehdään käyttämällä nykyistä suurikokoisempaa muuntajaa, jota käytettiin syöttämään järjestelmää sen ollessa vielä prototyyppiasteella. Virran THD-arvo laskee prototyypille tehtyjen mittausten mukaan arvoon 2,3 %, mikä on merkittävästi vähemmän kuin tämän työn mittauksessa saavutettu arvo. Harmonisten yliaaltovirtojen pienennettyä koko järjestelmän häviöt tulevat olemaan pienempiä, komponentit tulevat lämpenemään vähemmän sekä niiden elinikä tulee olemaan pidempi. Muuntajan vaihtaminen harmonisten yliaaltojen vaimentamiseksi on yksinkertainen ja käytännöllinen ratkaisu, sillä se ei vaadi monimutkaisten lisäsuotimien asennusta järjestelmään, jolloin säästetään komponentti- ja suunnittelukustannuksissa.

Tutkimuksessa epälineaarisen kuorman liittamisestä pohjois-amerikkalaisen ja eurooppalaisen konttiterminaalin keskijänniteverkkoon onnistuttiin löytämään keskijännitekaapelilähdön asennukseen tarvittavat komponentit, mikä tulee nopeuttamaan suunnitteluvaihetta ja komponenttien hankintaa. Epälineaarisen kuorman liittäminen konttiterminaalin keskijänniteverkkoon on mahdollista tehdä myös muiden valmistajien komponenteilla, mutta tässä työssä esitetyt komponentit luovat asennukselle kokonaiskuvan ja antavat yhden esimerkin kuorman liittämiseksi. Käyttöönottoa ajatellen releiden ylivirta- ja maasulkusuojauksen asetteluarvot ovat hyödyllistä tietoa, mutta suojauksen selektiivisyydestä on hyvä varmistua ennen lopullista käyttöönottoa suurempien käyttökatkojen välttämiseksi konttiterminaalissa.

LÄHTEET

- [1] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot 1: järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, Otatieto, Helsinki, 2011, 520 s.
- [2] Electrical installation guide: According to IEC international standards, Schneider Electric, Dokumenttinumero: 978.2.9531643.3.6, 2016, 580 s. Saatavissa: <https://www.schneider-electric.com/en/work/products/product-launch/electrical-installation-guide/>
- [3] SFS-EN 50160, Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2010, 63 s.
- [4] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, in: IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), New York, 2014, 29 s.
- [5] L. Kutt, E. Saarijarvi, M. Lehtonen, H. Molder, J. Niitsoo, Harmonic distortions of multiple power factor compensated EV chargers, 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, 7 s.
- [6] P.T. Staats, W.M. Grady, A. Arapostathis, R.S. Thallam, A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicle battery chargers, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, Iss. 3, 1997, 1258-1266 s.
- [7] J.C. Gomez, M.M. Morcos, Impact of EV Battery Chargers on the Power Quality of Distribution Systems, IEEE Power Engineering Review, Vol. 22, Iss. 10, 2002, 63 s.
- [8] A. Mansoor, W.M. Grady, A.H. Chowdhury, M.J. Samotyi, An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Iss. 1, 1995, 467-473 s.
- [9] M.H. Rashid, Power Electronics Handbook (4), Elsevier Science, Saint Louis, 2017, 1510 s.
- [10] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakelutekniikka, 2. uud. p. ed. Gaudeamus Helsinki University Press, Helsinki, 2009, 295 s.
- [11] J. Elovaara, Y. Laiho, Sähkölaitostekniikan perusteet, 2. korj. p. ed. Otakustantamo, Espoo, 1990, 487 s.
- [12] PowerXplorer PX5 User's guide, Dranetz, Dokumenttikoodi: P/N UG-PX5 Rev. J, 2005, 290 s. Saatavissa: <http://dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/PX5-UsersGuide-RevJ.pdf>

- [13] GenieEvo range catalogue, Schneider Electric, Dokumenttinumero: SE8889, 2015, 124 s. Saatavissa: <https://www.schneider-electric.co.uk/en/product-range-download/965-genieevo#tabs-top>
- [14] UC XLPE Catalogue, Universal Cable (M) Berhard, 2017, 68 s. Saatavissa: <http://www.ucable.com.my/images/products/UC%20XLPE%20Catalogue.pdf>
- [15] Network protection and automation guide, Alstom Grid, 2011, 508 s. Saatavissa: <http://electrical-engineering-portal.com/res/Network-Protection-And-Automation-Guide-2011.pdf>
- [16] Masterclad Metal-Clad Indoor Switchgear Instruction Bulletin, Schneider Electric, Dokumenttinumero: 6055-30, 2014, 164 s. Saatavissa: <https://www.schneider-electric.us/en/download/document/6055-30/>
- [17] General Cable Industrial Cable Catalogue, General Cable Technologies Corporation, Dokumenttinumero: INS-0043-R0916, 2016, 296 s. Saatavissa <http://general-cable.dcatalog.com/v/Industrial-Cable/#page=0>
- [18] J.C. Das, Harmonic Generation Effects Propagation and Control, 1st ed. CRC Press, Portland, 2017, 398 s.